



**Máster en Redes de Telecomunicación  
para Países en Desarrollo**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**PROYECTO FIN DE MÁSTER**

**Estrategia de Integración para equipos 802.11e-EDCA  
(WiFi) y 802.16 (WiMAX) con soporte para QoS.**

**Autora: Nydia Mendiola Almaraz  
Tutor: Francisco Javier Simó Reigadas**

Curso académico 2009/2010



## ACTA DE EVALUACIÓN

Alumna: Ing. Nydia Mendiola Almaraz

Titulación: Máster en Redes de Telecomunicación para Países en Desarrollo

Título del Proyecto: Estrategia de Integración para equipos 802.11e-EDCA (WiFi) y 802.16 (WiMAX) con soporte para QoS.

Tutor: Dr. Ing. Francisco Javier Simó Reigadas

### TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

### CALIFICACIÓN DETALLADA DEL PROYECTO

	Presidente	Vocal	Secretario
<b>Presentación escrita</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Presentación oral</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Complejidad técnica</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Metodología empleada</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Resultados obtenidos</b> (MB-B-R-M-MM)			
<b>Esfuerzo realizado</b> (MB-B-R-M-MM)			

### CALIFICACIÓN FINAL DEL PROYECTO

	SB / NOT / AP / SS / NP
(nota numérica)	Enmarcar la calificación alcanzada

PROYECTO PROPUESTO PARA MATRÍCULA DE HONOR: SÍ / NO  
(sólo si la nota numérica final es igual a 10)

Fuenlabrada, ..... de Julio de 2010

El Presidente

El Vocal

El Secretario



# Agradecimientos

*Después de una interminable lista de correcciones y varios meses de intenso trabajo, por fin este documento ha llegado a su fin; esto me da mucho gusto porque implica el final de una etapa en mi vida en la cual he aprendido muchas cosas y he tenido la oportunidad maravillosa de conocer un nuevo país, una nueva cultura y una forma diferente de hacer y ver las cosas.*

*En primer lugar quiero agradecer a mi director, pues sin él esto no hubiera sido posible; Javier, muchas gracias por todo el apoyo que me brindaste, por tus consejos, tu paciencia y tus observaciones, siempre oportunas, y sobre todo por la confianza que siempre has tenido en mí.*

*No puedo olvidar agradecer a la Universidad Rey Juan Carlos por abrirme sus puertas, y en especial a todos mis profesores del Máster COMPAD, por todo el conocimiento transmitido, su amistad y apoyo en todo momento.*

*A Jon, por ser parte de mi vida y porque gracias a él estoy hoy aquí escribiendo estas palabras, por ser mi compañero y amigo, por su apoyo incondicional y su aguante, por todas sus enseñanzas y consejos, que me han dado soporte en todo momento. A mi familia, porque a pesar de la distancia siempre me han apoyado incondicionalmente en todos mis proyectos. A mi mamá, por estar siempre pendiente de mí y por su cariño, por ser mi ejemplo a seguir; a mi papá, por todos sus consejos y sus palabras; a mis hermanas Lore, Mayra, Nelly y Khyaris, por ser parte de mi vida y estar conmigo en las buenas y en las malas.*

*A Marina y Juanma, mis compañeros de batalla en gran parte de este proyecto. Y a toda la gente maravillosa con la que he compartido esta etapa de mi vida: a Patricia y Katty por su amistad y por aquellas largas horas de estudio juntas, a Nacho por todo su apoyo y sus consejos y por enseñarme que las cosas no son tan complicadas como a veces parecen; a Carlos, José, Rico, Prunne, Inés, Elsa, Ale, etc., por brindarme su amistad y hacer que mi estancia en Madrid sea mas placentera. Muchas gracias a todos.*



# Resumen

Las TIC en la actualidad, son una herramienta importante para lograr la igualdad de oportunidades en el mundo y mejorar las condiciones de los grupos más vulnerables, como es el caso de las poblaciones en zonas rurales. Sin embargo, en los países en desarrollo la penetración de Internet es tan sólo del 12 %, lo que pone de manifiesto la importancia de desarrollar equipamiento de bajo coste que permita el despliegue de redes en estas zonas.

Una de las opciones para facilitar el despliegue de redes es la adaptación y combinación de diferentes tecnologías en bandas no licenciadas para que sean accesibles a las poblaciones que habitan en zonas rurales aisladas. Estas redes deben ser capaces de proporcionar calidad de servicio (QoS) a aquellas aplicaciones que así lo requieran, tales como las comunicaciones de voz o videoconferencia, las cuales tienen una sensibilidad al retardo inherente y demandan una cantidad determinada de recursos en la red.

El objetivo de este proyecto es diseñar una estrategia para integrar equipos WiMAX (802.16) y WiFi (802.11e-EDCA), de tal forma que se proporcione QoS extremo a extremo en una red heterogénea que permita la provisión económica y técnicamente eficiente de servicios digitales de banda ancha en entornos rurales.

Muchos estudios recientes han abordado el tema de QoS en redes híbridas con diferentes enfoques, algunos con un alto nivel de complejidad, otros con tecnologías que no están disponibles comercialmente. Estas características hacen que éstas propuestas sean inviables en el contexto de zonas rurales; por ello es interesante explorar la adaptación y combinación de tecnologías como IEEE 802.16 (WiMAX fijo) e IEEE 802.11e para su uso adecuado en este contexto.

Este PFM analiza en detalle la provisión de QoS en cada una de las tecnologías involucradas: los estándares IEEE 802.16 e IEEE 802.11e-EDCA a nivel capa MAC y el mecanismo DiffServ en capa IP, con la finalidad de conocer y aprovechar las mejores características de cada una de ellas que nos permitan cumplir con el objetivo planteado.

La principal aportación es, por tanto, una propuesta de equipo híbrido que integra equipos comerciales WiMAX (802.16) y WiFi-EDCA (802.11e-EDCA) para proporcionar QoS en una red híbrida. Con este fin, se han definido cada uno de los módulos que integran la arquitectura.

Para validar el funcionamiento de la estrategia de integración, se han realizado una serie de pruebas en dos escenarios punto a multipunto, analizando los resultados de los diferentes casos en orden de complejidad, de forma que se pueda comprobar el correcto funcionamiento del sistema y los beneficios alcanzados.

## *Resumen*



# Índice

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. Presentación</b>	<b>3</b>
1.1. Motivación . . . . .	3
1.2. Organización del documento . . . . .	4
1.3. Marco de referencia . . . . .	5
1.3.1. Proyecto Open Reach . . . . .	5
1.3.2. TIC's en Zonas Rurales . . . . .	6
1.3.3. Problemas con la provisión de QoS en redes híbridas . . . . .	7
<b>2. Contexto</b>	<b>9</b>
2.1. Introducción a la Calidad de Servicio . . . . .	9
2.2. Provisión de QoS en el estándar IEEE 802.11e (WiFi) . . . . .	11
2.2.1. QoS en IEEE 802.11e-EDCA . . . . .	12
2.3. Provisión de QoS en el estándar IEEE 802.16-2009 (WiMAX) . . . . .	15
2.3.1. Mecanismo de Garantía de QoS . . . . .	16
2.4. Provisión de QoS en capa IP . . . . .	18
2.4.1. Servicios Diferenciados: DiffServ . . . . .	18
2.5. Trabajos Previos . . . . .	21
<b>3. Objetivo</b>	<b>25</b>
<b>II. METODOLOGÍA</b>	<b>27</b>
<b>4. Metodología de trabajo y medios materiales</b>	<b>29</b>
4.1. Metodología de trabajo . . . . .	29
4.2. Medios materiales . . . . .	30
4.3. Herramientas software . . . . .	32

<b>III. RESULTADOS</b>	<b>35</b>
<b>5. Descripción de la Propuesta de Integración</b>	<b>37</b>
5.1. Estrategia de integración para IEEE 802.11e modo EDCA e IEEE 802.16 con soporte para QoS . . . . .	37
5.2. Tipos de tráfico y mapeado . . . . .	39
5.3. Bloque WiMAX . . . . .	41
5.3.1. Aprovisionamiento de flujos de servicio . . . . .	42
5.4. Bloque WiFi . . . . .	44
5.4.1. Capa IP: DiffServ . . . . .	44
5.4.1.1. Implementación de DiffServ mediante $t_c$ . . . . .	45
5.4.1.2. Control de admisión . . . . .	48
5.4.2. Capa MAC: ajuste de parámetros de contienda . . . . .	50
5.4.2.1. Valores de los parámetros de contienda EDCA . . . . .	53
<b>6. Validación de la Propuesta de Integración</b>	<b>55</b>
6.1. Descripción del Escenario de Pruebas . . . . .	55
6.1.1. Metodología y consideraciones previas . . . . .	56
6.2. Diseño de pruebas de verificación . . . . .	60
6.2.1. Pruebas sin Calidad de Servicio . . . . .	61
6.2.2. Pruebas con Calidad de Servicio . . . . .	61
6.2.2.1. Pruebas en el Escenario N°1 . . . . .	62
6.2.2.2. Pruebas en el Escenario N°2 . . . . .	64
6.3. Presentación de Resultados . . . . .	65
6.3.1. Escenario de pruebas N°1 . . . . .	65
6.3.2. Escenario de pruebas N°2 sin tráfico interno . . . . .	72
6.3.3. Escenario de pruebas N°2 con tráfico interno . . . . .	80
6.3.4. Flujos al máximo establecido . . . . .	89
<b>IV. CONCLUSIONES</b>	<b>95</b>
<b>7. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>97</b>
<b>V. APÉNDICES</b>	<b>101</b>
<b>A. Script de Configuración de Equipos WiFi</b>	<b>103</b>
<b>B. Especificaciones de los equipos</b>	<b>107</b>

# Lista de Figuras

2.1. Esquema de EDCA . . . . .	13
2.2. Elementos que conforman un dominio Diffserv . . . . .	19
2.3. Campo de identificación Diffserv DS . . . . .	20
5.1. Arquitectura de red . . . . .	38
5.2. Diagrama de bloques de la Propuesta de Integración . . . . .	39
5.3. Propuesta de mapeado de tráfico para WiFi y WiMAX . . . . .	41
5.4. Representación esquemática de flujos de tráfico interno del bloque WiFi. . . . .	48
5.5. Árbol de disciplinas de colas $\tau c$ para la implementación de DiffServ de este proyecto. . . . .	49
5.6. Disposición de las interfaces de red del Punto de Acceso y el sentido de los enlaces de comunicación. . . . .	49
6.1. Escenario de pruebas N°1 . . . . .	56
6.2. Escenario de pruebas N°2 . . . . .	56
6.3. Análisis del caudal. Prueba 1.1.a) . . . . .	66
6.4. Porcentaje de paquetes perdidos. Prueba 1.1.a) . . . . .	67
6.5. Análisis del Retardo. Prueba 1.1.a) . . . . .	68
6.6. Análisis de <i>jitter</i> . Prueba 1.1.a) . . . . .	68
6.7. Análisis del caudal. Prueba 1.1.b) . . . . .	69
6.8. Porcentaje de paquetes perdidos. Prueba 1.1.b) . . . . .	70
6.9. Análisis del Retardo. Prueba 1.1.b) . . . . .	70
6.10. Análisis de <i>jitter</i> . Prueba 1.1.b) . . . . .	71
6.11. Análisis de caudal. Prueba 2.1.a) . . . . .	72
6.12. Porcentaje de paquetes perdidos. Prueba 2.1.a) . . . . .	73
6.13. Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.1.a) . . . . .	74
6.14. Análisis de <i>jitter</i> por tipo de tráfico. Prueba 2.1.a) . . . . .	75
6.15. Análisis de caudal. Prueba 2.1.b) . . . . .	76
6.16. Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Prueba 2.1.b) . . . . .	77
6.17. Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.1.b) . . . . .	78
6.18. Análisis de <i>jitter</i> por tipo de tráfico. Prueba 2.1.b) . . . . .	79
6.19. Análisis de caudal. Prueba 2.2.a) . . . . .	80
6.20. Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Prueba 2.2.a) . . . . .	81
6.21. Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.2.a) . . . . .	82

## Lista de Figuras

6.22. Análisis de <i>jitter</i> por tipo de tráfico. Prueba 2.2.a)	83
6.23. Gráfica Caudal/Tiempo. Ejemplo del comportamiento de los flujos sin QoS.	84
6.24. Análisis de caudal. Prueba 2.2.b)	85
6.25. Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Prueba 2.2.b)	86
6.26. Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.2.b)	87
6.27. Análisis de <i>jitter</i> por tipo de tráfico. Prueba 2.2.b)	88
6.28. Análisis de caudal. Flujos al máximo establecido	89
6.29. Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Flujos al máximo establecido	90
6.30. Análisis de retardo por tipo de tráfico. Flujos al máximo establecido	91
6.31. Análisis de <i>jitter</i> por tipo de tráfico. Flujos al máximo establecido	92
B.1. Fotografía de los equipos utilizados durante las pruebas de validación	107
B.2. Especificaciones equipos WiMAX - 1	108
B.3. Especificaciones equipos WiMAX - 2	109
B.4. Especificaciones Placa Alix - 1	110
B.5. Especificaciones Placa Alix - 2	111
B.6. Especificaciones Placa Wrap - 1	112
B.7. Especificaciones Placa Wrap - 2	113

# Lista de Tablas

2.1.	Parámetros EDCA por defecto del estándar IEEE 802.11e [1]. . . . .	14
2.2.	Códigos DSCP para el perfil AF . . . . .	20
4.1.	Descripción Equipos WiMAX. . . . .	30
4.2.	Descripción de Equipos WiFi. . . . .	31
4.3.	Descripción de ordenadores y otro equipo Hardware. . . . .	31
5.1.	Mapeado de códigos TOS a categorías de acceso EDCA realizado por el <i>driver</i> MadWifi versión 0.9.4. . . . .	40
5.2.	Recomendaciones ITU para los parámetros de QoS [2] . . . . .	42
6.1.	Propuesta de marcado de tráfico durante las pruebas de funcionamiento de la estrategia de integración . . . . .	60
6.2.	Reparto del caudal disponible. . . . .	62
6.3.	Valores de los parámetros de configuración ( <i>rate</i> y <i>ceil</i> ) para DiffServ . . .	63
6.4.	Valores de los parámetros de configuración EDCA . . . . .	63



**Parte I**  
**INTRODUCCIÓN**





# Capítulo 1

## Presentación

### 1.1. Motivación

Más de la mitad de la población mundial vive en zonas rurales que carecen completamente de infraestructuras de telecomunicación terrestres y por lo tanto están aisladas de las grandes redes de información. Situación que difícilmente cambiará, ya que en muchas de estas regiones no resulta viable desplegar redes de operador debido al bajo poder adquisitivo de sus habitantes, la baja densidad de la población, la disponibilidad limitada de alimentación eléctrica y multitud de problemas relacionados con la accesibilidad, la seguridad, etc. Por lo tanto, existe un desafío importante en encontrar tecnologías apropiadas de bajo coste para la conexión a Internet y a la red telefónica desde lugares con estas características. [3]

Las comunicaciones por satélite durante muchos años fueron la única solución práctica para proveer el acceso a todo tipo de redes de comunicación en zonas rurales. Sin embargo, aunque esto resuelve técnicamente el problema, esta solución lleva consigo altos costes de operación fuera del alcance de muchas de estas comunidades. En los últimos años, han surgido nuevas soluciones para dar cobertura a estas zonas adaptando el estándar IEEE 802.11 (WiFi) y sus variantes a,b y g, para proveer acceso inalámbrico para largas distancias (WiLD). Esta tecnología ha sido desplegada exitosamente en muchas zonas rurales de países en desarrollo [4, 5, 6, 7] con la finalidad de mejorar la salud o la educación mediante el uso de TIC's.

Dentro del contexto de este proyecto, este tipo de soluciones presenta varias ventajas: operación en bandas no licenciadas, bajos costes y bajo consumo de los equipos, alta disponibilidad, variedad de productos estandarizados, etc. Sin embargo, debido a los avances tecnológicos se hace evidente la necesidad de contar con redes que proporcionen adecuadas prestaciones de calidad de servicio (QoS), con la finalidad de que soporten las aplicaciones con estrictos requerimientos de QoS, como la telefonía o telepresencia, las cuales necesitan que se garanticen ciertos niveles de caudal, retardo y *jitter* que no pueden estrictamente proporcionados por una red WiFi, debido a la aleatoriedad de este tipo de redes.

Para cumplir con este objetivo, en el año 2005, la IEEE publicó el estándar 802.11e [1], una enmienda de 802.11 para proveer QoS. Este estándar establece dos modos de operación, uno para QoS parametrizada denominado HCCA, y otro para QoS priorizada llamado EDCA. Aunque el primero permite un mejor control de los recursos disponibles, la industria solamente ha

desarrollado dispositivos que implementan EDCA, debido a su simplicidad. De esta manera, aunque el acceso WiLD puede ofrecer priorización de flujos [8, 9], no es posible garantizar una cantidad exacta de recursos para cada aplicación.

Por otro lado, en 2004, el IEEE publicó el estándar 802.16 (actualmente 802.16-2009) [10], comúnmente conocido como WiMAX: un estándar específicamente diseñado para Redes Metropolitanas de Área Extendida (WMAN) y concebidas para proveer comunicación determinista orientada a conexión con QoS. Desde el principio WiMAX fue considerada como la herramienta para resolver los problemas de comunicación en zonas rurales de países en desarrollo [11], sin embargo, los altos costes y el consumo de los equipos WiMAX dificultan su adopción masiva en el contexto que nos ocupa.

Como se puede observar, las dos tecnologías aquí presentadas tienen ventajas y desventajas en cuanto a la provisión de QoS en redes en zonas rurales de países en desarrollo. Por lo anterior, es interesante investigar nuevas formas de ampliar la cobertura WiMAX para proporcionar la calidad de servicio que requieren las redes de estas zonas, como en el caso concreto de este proyecto, en el que se pretende integrar las tecnologías 802.11e EDCA y 802.16-2009, con finalidad de aprovechar las ventajas que presentan ambas tecnologías en cuanto a la provisión de QoS y a su vez disminuir los costes, para hacer viable su despliegue en zonas rurales.

## 1.2. Organización del documento

La organización del documento y un breve resumen de cada capítulo se presenta a continuación:

**Capítulo 1. Presentación**, en donde se realiza la presentación de este PFM, a través de los hechos que han motivado su realización dentro del marco de trabajo de zonas rurales de países en vías de desarrollo. Asimismo, se presenta al lector el marco de referencia dentro del cual se desarrolla esta investigación, introduciendo el proyecto Open Reach y un resumen de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en las zonas rurales aisladas de países en vías de desarrollo, describiendo finalmente la problemática que se debe resolver.

**Capítulo 2. Contexto**, que comienza definiendo el concepto de calidad de servicio (QoS), y los aspectos importantes de cada una de las tecnologías involucradas en la integración. En este capítulo se hace una revisión de los estudios relevantes sobre la integración de redes IEEE 802.11e-EDCA e IEEE 802.16-2009.

**Capítulo 3. Objetivo**, donde se definen los objetivos de esta investigación.

**Capítulo 4. Metodología de trabajo y medios materiales**, en el cual se expone el procedimiento que se llevó a cabo para poder desarrollar la estrategia de integración, incluyendo una descripción de las características de los equipos, así como del software que se

empleo durante el desarrollo del proyecto.

**Capítulo 5. Descripción de la Propuesta de Integración**, donde se explican los detalles de la aportación principal de este PFM, una Estrategia de Integración para Equipos 802.11e-EDCA e IEEE 802.16-2009 con soporte para QoS, mencionando las características de cada uno de los módulos que la forman y su funcionalidad con la finalidad de proveer QoS extremo a extremo en una red híbrida.

**Capítulo 6. Validación de la propuesta de integración**, en este capítulo se describen los escenarios de pruebas que se proponen para validar la propuesta de integración, así como la batería de pruebas que se llevará a cabo para verificar el buen funcionamiento de la estrategia de integración.

**Capítulo 7. Conclusiones y Trabajo Futuro**, en este último capítulo se ha realizado una discusión de los resultados obtenidos en este PFM y se proponen futuras líneas de investigación para mejorar la estrategia de integración aquí presentada.

## 1.3. Marco de referencia

En este apartado se describirá el escenario que enmarca a este PFM, comenzando con el Proyecto Open Reach dentro del cual se llevó a cabo, posteriormente se hará una breve introducción a las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en las zonas rurales aisladas de países en vías de desarrollo, con la finalidad de ubicar el contexto dentro del cual podría ser aplicada la estrategia de integración y finalmente se describirá la problemática que surge cuando se unen dos tecnologías y no se habilitan mecanismos adecuados de QoS a todo lo largo de la red.

### 1.3.1. Proyecto Open Reach

Este PFM se ha desarrollado como una pequeña parte del Proyecto Open Reach, cuyo objetivo fue el desarrollo de técnicas y sistemas que permitan la provisión económica y técnicamente eficiente de servicios digitales de banda ancha en entornos rurales o especialmente dispersos. Dicho proyecto estuvo financiado por el Ministerio de Industria, a través de la convocatoria de ayudas de la Acción Estratégica de Telecomunicaciones y S.I. (Plan Avanza) 2009. Subprograma Avanza I+D.

El proyecto Open Reach pretende proporcionar soluciones completas que minimizan el coste de infraestructura en las redes WiMAX, principal factor hasta ahora que ha limitado el despliegue de esta tecnología de forma viable en entornos rurales.

El proyecto tuvo un marcado carácter tecnológico e innovador e incluyó un alto contenido de diseño hardware y software orientado al desarrollo de sistemas de infraestructura de bajo coste que maximicen la extensión de cobertura, como estaciones retransmisoras, estaciones base que incorporen antenas inteligentes y técnicas MIMO, topologías Mesh, y sistemas integrados

WiMAX-WiFi con soporte de calidad de servicio; el proyecto presentado en este PFM se incluye en este último apartado.

La realización de este proyecto en concreto se ha desarrollado en dos partes, en la primera de ellas se llevó a cabo la investigación teórica y una propuesta de integración, que se finalizó con la creación de un equipo híbrido 802.11e-EDCA e IEEE 802.16-2004 en una segunda fase.

En este proyecto han participado principalmente tres entidades: Albentia Systems como fabricante y proveedora de equipos WiMAX, Ingenova Consulting como empresa proveedora de servicios y la Universidad Rey Juan Carlos que ha realizado investigación teórica y desarrollo de distintas propuestas que forman parte de este proyecto.

### 1.3.2. TIC's en Zonas Rurales

En la actualidad las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) tienen un gran impacto en varios niveles de la sociedad y son consideradas como una herramienta para incrementar el desarrollo humano [12]. De hecho, hoy en día se considera que Internet es una tecnología de uso común y que el acceso a la banda ancha forma parte de la infraestructura básica, del mismo modo que la electricidad o las carreteras. En algunos países, como Estonia, Finlandia y Francia, el acceso a Internet ya es uno de los derechos fundamentales de sus ciudadanos.[13].

Así lo han reconocido organismos internacionales como la ONU que en uno de los puntos contenidos en los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)<sup>1</sup> [14], se refiere concretamente a asegurar que los beneficios provistos por las nuevas tecnologías, en particular las TICs, estén disponibles para toda la población. Por su parte la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) también ha subrayado la necesidad de que la tecnología llegue a toda la gente y pugnó por garantizar el acceso al internet de banda ancha a la mitad de la población para 2015. [12]

Es importante señalar que la penetración de la tecnología móvil celular en los últimos años ha tenido un crecimiento y la evolución espectaculares, lo que ha permitido conectar zonas que hasta entonces no lo estaban. Hoy, casi 90 % de la población mundial tiene cobertura de una red móvil celular, sin embargo, tan sólo el 25 % de la población mundial tiene acceso a Internet y concretamente en los países en desarrollo la penetración de Internet es de tan sólo el 12 % [13], lo que pone de manifiesto la importancia de desarrollar equipamiento de bajo coste que permita el despliegue de redes de banda ancha inalámbrica en zonas rurales, que proporcionen prestaciones adecuadas a los requerimientos de las aplicaciones actuales.

Una de las opciones para mejorar el acceso a este tipo de redes es la adaptación y combinación de diferentes tecnologías en bandas no licenciadas para que sean accesibles a las poblaciones que habitan en zonas rurales aisladas. Estas redes dado el paradigma tecnológico de hoy en día deben ser capaces de proporcionar calidad de servicio a aquellas aplicaciones que así lo

---

<sup>1</sup>Dichos objetivos establecen una serie de metas claras y concisas a cumplir para el año 2015 que se refieren, sucintamente, a la erradicación de la pobreza extrema y el hambre, a potenciar la equidad de género, a la mejora en las condiciones sanitarias, el fomento de la sustentabilidad del medio ambiente y, en términos generales, promover el desarrollo de las naciones más pobres.

requieran tales como comunicaciones de voz o vídeo de calidad a distancia, las cuales tienen una sensibilidad al retardo inherente y demandan una cantidad determinada de recursos en la red.

### 1.3.3. Problemas con la provisión de QoS en redes híbridas

La unión de dos o más tecnologías en un ambiente integrado cuyas características son totalmente diferentes es un gran desafío, y más cuando se requiere que estas compartan mecanismos como la provisión de QoS, ya que esto implica que se tengan que aprovechar al máximo las ventajas que tiene cada una de ellas y tratar de minimizar las desventajas.

Los escenarios de red implicados en este proyecto están compuestos por diferentes segmentos de red y tecnologías, en donde cada segmento de red implementa diferentes soluciones de QoS, de tal forma que los algoritmos para satisfacer los requerimientos de QoS cambian junto con los parámetros de desempeño de cada tecnología.

El objetivo que se persigue es el de ofrecer garantías de QoS extremo a extremo sobre una red heterogénea de forma transparente para los usuarios, ya que de lo contrario se podrían presentar irregularidades como el aumento en el retardo, *jitter* y/o en la pérdida de paquetes, lo que ocasionaría que las comunicaciones de tiempo real como las comunicaciones de voz, las videoconferencias, etc., sufrieran un deterioro que las hiciera inviables. Es por tanto muy importante que la QoS se garantice en cada uno de los segmentos de red que conforman el sistema de comunicaciones.

Se puede observar que, así como los datos que se desean transmitir, los requerimientos de QoS deben atravesar toda la red desde el origen (transmisor) hasta el destino (receptor) a través de los distintos segmentos de red que implementan diferentes tecnologías y protocolos. Dichos requerimientos de QoS deben ser recibidos y entendidos por cada segmento de red, donde la QoS tiene diferentes significados e interpretaciones que dependen del protocolo utilizado y de las características de la red, motivo por el cual deben existir mecanismos de control adecuados para conseguir dicho objetivo. Además, se debe considerar que cada tecnología presente en la red se compone de una arquitectura de capas funcionales (modelo OSI) y que cada una de estas capas debe tener una función en la provisión de QoS, de tal forma que cada capa proveerá el servicio de QoS a las capas superiores, y la QoS extremo a extremo se proporcionará mediante la cooperación de cada una de las capas en cada uno de los segmentos de red involucrados.

La QoS global dependerá entonces de la QoS alcanzada en cada una de las capas y segmentos de red involucrados, basándose en las funciones desempeñadas por cada uno de los elementos que la conforman. Por ejemplo, si la capa IP implementa un mecanismo eficiente de QoS, es necesario que la capa MAC pueda asegurar un servicio específico a la capa IP, de otra manera la implementación de cualquier mecanismo de QoS en la capa IP sería inútil. Lo mismo sucede entre los diferentes segmentos de la red, aunque el estándar IEEE 802.16 (WiMAX) implemente un mecanismo eficiente de QoS, si en el lado WiFi no se garantizan unos niveles mínimos de QoS no serviría de nada lo que pueda conseguir por sí sola la red WiMAX, ya que los requerimientos de QoS deben fluir tanto verticalmente (dentro de cada tecnología) como horizontalmente (de un segmento a otro de la red) y necesitan ser recibidos, entendidos y satis-

fechos por todos los elementos que conforman a la red heterogénea.

Cabe mencionar, que los dispositivos utilizados en esta estrategia de integración tienen una capa IP que les permite comunicarse a nivel de red; sin embargo, las capas MAC de ambos estándares son muy diferentes entre sí y no comparten la forma en que proporcionan la QoS. Mientras que en el estándar IEEE 802.16 (WiMAX) se provee una solución orientada a conexión, en donde los parámetros y requerimientos de QoS están completamente definidos así como las herramientas para garantizar la QoS para cada cliente específico, es decir, la QoS es parametrizada, en el estándar IEEE 802.11e, debido a la facilidad de implementación y al costo, únicamente se dispone de equipos comerciales con tecnología EDCA que ofrece tan sólo QoS de forma priorizada, la cual se debe complementar con las herramientas disponibles en la capa IP.

En resumen, los problemas asociados con la provisión de QoS extremo a extremo en una red híbrida se enlista a continuación, junto con algunas propuestas que podrían solucionar dicha problemática.

1. *Los requerimientos de QoS se deben garantizar en toda la red desde el origen hasta el destino, pasando a través de partes o segmentos de red que implementan diferentes protocolos (TCP/IP, WiFi, WiMAX) e incluso medios de transmisión (alámbrico, inalámbrico).* Si se dispone, como en nuestro caso, de una red híbrida compuesta por dos segmentos y sólo uno de ellos dispone de mecanismos de QoS, el otro puede introducir exceso de retardo, *jitter*, o reducir el caudal y producir pérdidas de paquetes hasta llegar por debajo de los límites recomendados, de tal forma que en este otro extremo no se perciba QoS adecuada. Además, no es suficiente que existan mecanismos de QoS en cada uno de los integrantes de la red heterogénea, sino que esta provisión debe hacerse para cada flujo de datos que atraviese los segmentos de dicha red, dado que si se acepta un flujo en la primera parte de la red sin consultar a la segunda, aunque esta disponga de mecanismos de QoS, podría no disponer de recursos suficientes y no proveer la QoS requerida.
2. *Los requerimientos de QoS deben ser mapeados a todas las capas de un segmento de red.* Si se dispone de mecanismos de QoS en la capa IP y otros en la capa MAC ambos deben ser mapeados entre sí de tal forma que se realice una clasificación correcta del tráfico y, por lo consiguiente, un tratamiento de éste que consiga complementar ambos.
3. *Los requerimientos de QoS deben ser recibidos y entendidos por cada segmento específico dentro de la red.* Debe haber un mecanismo (por ejemplo, el marcado DSCP o prioridades 802.1D que se definirán más adelante) que transporte los requerimientos de QoS a través de ambas partes de la red híbrida y que garantice la QoS en ambos extremos.
4. *Cada segmento está compuesto por una arquitectura de capas y cada capa debe tener un rol específico en la provisión de QoS.* Si, por ejemplo, se dispone de mecanismos de QoS en la capa IP pero no en la capa MAC el tratamiento que reciban los paquetes en la primera no resultará en un aprovisionamiento de QoS eficaz, ya que al realizar un acceso al medio sin QoS, o solamente con QoS priorizada (sobre todo en condiciones de saturación), se deteriorará la QoS conseguida en la capa IP.

# Capítulo 2

## Contexto

En el presente Capítulo se analizará el contexto dentro del cual se desarrolla este PFM, para lo cual hemos realizado una revisión de las tecnologías involucradas en el aprovisionamiento de QoS en las capas de enlace y de red, con base en los esfuerzos realizados por organizaciones de estandarización como IEEE e IETF. De igual forma, se presentarán las principales contribuciones de la literatura científica con respecto a la integración de dichas tecnologías.

Se comienza introduciendo el concepto de Calidad de Servicio y las diferentes formas en las que esta se puede proveer dentro de una red, posteriormente nos centraremos en la presentación de los estándares 802.16-2009 (WiMAX) e IEEE 802.11e-EDCA, profundizando en el funcionamiento de la capa MAC y en la manera en que estos estándares proveen calidad de servicio. Se complementará este capítulo mediante el análisis de la provisión de QoS en la capa de red, presentando las dos principales propuestas del IETF, servicios diferenciados y servicios integrados, pues para que la provisión de QoS tenga éxito esta debe ser provista en todas las capas involucradas en la red.

Finalmente, se analizarán los principales trabajos que se han centrado en el estudio de la coexistencia entre las dos tecnologías, identificando los aspectos principales que debe cumplir una propuesta de integración y las carencias de dichas investigaciones.

### 2.1. Introducción a la Calidad de Servicio

La implantación de Calidad de Servicio (*Quality-of-Service, QoS*) es esencial para el éxito de aplicaciones avanzadas, como telepresencia, videoconferencia y *VoIP* (voz sobre IP o telefonía sobre IP) especialmente en una red con capacidad limitada o con un gran número de usuarios, debido a que este tipo de aplicaciones demanda ciertos requerimientos como un ancho de banda mínimo garantizado y/o un servicio diferenciado. En muchos casos es necesario garantizar que la transmisión de los datos sea realizada sin interrupción o pérdida de paquetes, para lo cual la calidad de servicio juega un papel muy importante.

La QoS se puede definir como la capacidad de una red de ofrecer a determinados servicios ciertas garantías de calidad que los hagan viables, o dicho de otra manera como la capacidad de un elemento de red (bien una aplicación, un servidor, un encaminador, un conmutador, etc.) de

asegurar que su tráfico y los requisitos del servicio previamente establecidos puedan ser satisfechos.

La meta principal de la QoS es proveer priorización incluyendo ancho de banda dedicada, *jitter* y latencia controlados y mejorar cantidad de pérdidas. También es importante asegurar que la prioridad de uno o más flujos no hace que se pierda la de otros.

Para evaluar la QoS en redes de comunicación, tenemos que encontrar algunos mecanismos que nos permitan medir la calidad de los mismo, para lo cual suele utilizar un uso combinado de cuatro medidas: 1) Requerimiento de ancho de banda, 2) Limitación en retardo o latencia, 3) Limitación en la variación del retardo o *jitter* y 4) Limitación en la pérdida de paquetes.

Estas variables combinadas permiten definir diferentes tipos de servicios, con diferentes requerimientos de ancho de banda, retardo, *jitter* y paquetes perdidos. Por ejemplo, el servicio *best effort (BE)* define aquellos servicios que no requieren garantías de QoS, lo que implica que no existe una preasignación de recursos, ni requerimientos y por lo tanto no se garantiza la recepción correcta de la información.

Existen dos formas principales en las cuales se puede proveer QoS,

1. La forma **priorizada** la cual se basa en asignar unos privilegios relativos entre unas clases de tráfico y otras. Este tipo de QoS garantiza que una clase de tráfico con más prioridad, será tratada mejor que otra con menos prioridad, pero no garantiza que los parámetros de calidad de ninguna de ellas valgan ningún valor concreto. Los resultados que ofrece este tipo de QoS tienen carácter estadístico, en el sentido de que, a la larga, tienden a marcar resultados significativos entre unos tipos de tráfico y otros, pero en momentos puntuales, la variabilidad puede ser grande.
2. La forma **parametrizada** que es aquella que se consigue de forma absoluta, mediante la asignación directa de los parámetros de QoS deseados y la reserva de los recursos necesarios para garantizarla. Requiere una mayor complejidad entre las entidades involucradas, puesto que para poder reservar y asignar los recursos convenientemente, debe poder realizarse una negociación y control adecuados.

Se debe tomar en cuenta, que para que en una red pueda ofrecer el manejo de QoS extremo a extremo, es necesario que todas las capas y elementos presentes en la red posean mecanismos de QoS que ofrezcan un desempeño adecuado a la aplicación en cuestión. Desde este punto de vista, la QoS también se puede definir como el conjunto de protocolos y tecnologías que garantizan la entrega de datos a través de una red en un momento dado, lo cual permite a los administradores de red manejar los efectos de la congestión del tráfico usando óptimamente los diferentes recursos de la red.

La correcta implementación de mecanismos que provean QoS en una red reporta varios beneficios para los usuarios entre los más importantes podemos mencionar el uso más eficiente de los recursos de la red, gestión de aplicaciones sensibles al retardo y *jitter*, control de paquetes perdidos, establecimiento de prioridades de tráfico y el manejo adecuado de los recursos en casos congestión de la red. Sin embargo, también lleva consigo el aumento en los costes de



despliegue de una red y cierto grado de complejidad en la implementación.

Cabe mencionar que en la propuesta de integración presentada en este PFM se van a integrar dos tecnologías (IEEE 802.16-2004 e IEEE 802.11e EDCA) que ofrecen QoS de manera distinta, de tal forma que ambas se complementen, preservando en la medida de lo posible la QoS ofrecida a las distintas aplicaciones, posibilitando de esta forma una extensión de la cobertura en zonas rurales a un costo más razonable que el de una infraestructura WiMAX pura. En los siguientes apartados se describirá con más detalle como proveen la QoS las tecnologías implicadas en esta propuesta.

## 2.2. Provisión de QoS en el estándar IEEE 802.11e (WiFi)

La tecnología 802.11 [1] es en la actualidad la más popular como red de acceso inalámbrica. El estándar original, creado para cubrir redes de área local, fue publicado por el IEEE en 1997. Desde el principio ha ofrecido significativas ventajas respecto a las tradicionales redes de acceso cableadas debido a los bajos costes de despliegue y mantenimiento de la infraestructura, que le han permitido constituirse como una de las tecnologías más usadas y con mayor índice de penetración, debido al uso de bandas libres de licencia, como la banda industrial, médica y científica (ISM, Industrial Scientific and Medical) situada sobre los 2.4GHz, al bajo coste de sus equipos, a su flexibilidad, bajo consumo y a la existencia de certificados de interoperabilidad entre vendedores como Wi-Fi<sup>1</sup>, así como de un marco de regulación muy favorable en relación con otras tecnologías tipo radio.

A las versiones iniciales del protocolo 802.11a y 802.11b, se han ido añadiendo otras como 802.11g (en 2003) que incrementa la capacidad hasta los 54 Mbps en 2,4GHz ó 802.11e (en 2005), que introduce la calidad de servicio.

El protocolo IEEE 802.11 define la capa física y de enlace para una transmisión inalámbrica. Básicamente este estándar define dos métodos de acceso al canal compartido radio: uno distribuido o DFC (Distributed Coordination Function) basado en el Acceso Múltiple a la Portadora con Prevención de Colisión (Carrier sense multiple acces with collision avoidance - CSMA/CA) y otro centralizado o PCF (Point Coordination Function) basado en sonde o *polling*. Este último ha sido raramente implementado en hardware, y los desarrolladores han preferido el modo distribuido.

Los modos tradicionales de 802.11 no tienen ningún mecanismo de provisión de QoS motivo por el cual se ha propuesto un complemento al estándar denominado 802.11e. En el estándar IEEE 802.11e, la Calidad de Servicio se proporciona mediante dos mecanismos distintos. El primero, llamado EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), es una versión mejorada del modo de trabajo distribuido (*Distributed Coordination Function*, DCF) de las versiones

---

<sup>1</sup>Wi-Fi Alliance es la organización comercial que adopta, prueba y certifica que los equipos cumplen los estándares 802.11. Todos los equipos que tengan el sello Wi-Fi pueden trabajar juntos sin problemas independientemente del fabricante de cada uno de ellos

predecesoras del IEEE 802.11 y proporciona QoS priorizada. El segundo mecanismo, llamado HCCA, es a su vez la modalidad con Calidad de Servicio del modo de trabajo centralizado (PCF) de versiones anteriores, y ofrece mecanismos que permiten tener una QoS parametrizada.

Obviamente, el modo de operación HCCA, al considerar QoS parametrizada, supone la mejor alternativa para soportar a los requerimientos de las aplicaciones en tiempo real, en una red híbrida como la que se plantea en este proyecto. Sin embargo, este tipo de sistemas centralizados suponen más complejidad, no son eficientes para transmisiones de datos y necesitan sincronización. Es por ello al igual que modo PDF, HCCA apenas ha sido implementado en la práctica. Por lo que, a pesar de los posibles inconvenientes en términos de QoS del modo EDCA, este más sencillo, fácil de instalar y no supone gran coste en cuanto a mantenimiento y gestión, razón por la cual en este proyecto se utilizará el mecanismo EDCA, para la provisión de servicio en la capa MAC.

En el siguiente apartado se profundizará sobre la manera en que EDCA proporciona QoS.

### 2.2.1. QoS en IEEE 802.11e-EDCA

La QoS priorizada que proporciona 802.11-EDCA, permite que, a través de la correcta configuración de distintos parámetros de acceso al medio, se proporcione mayor o menor prioridad a las distintas tramas MAC o MPDU's (MAC Protocol Data Units) de acuerdo a la clase de tráfico a la que pertenezcan.

En este mecanismo, las diferentes estaciones inalámbricas (STA), acceden al medio físico en desigualdad de condiciones de acuerdo a la categoría de acceso (AC) que se le asigne de entre cuatro posibles. Así, las STA pertenecientes a la categoría con mayor prioridad esperan, en media, un número menor de ranuras de tiempo, y cuando consiguen ganar el acceso al medio, pueden mantenerlo ocupado un mayor periodo de tiempo. A continuación se explica más detenidamente cómo se consigue esta diferenciación de servicio.

IEEE 802.11e EDCA utiliza 4 categorías de acceso (Access Categories - AC's) para manejar las distintas prioridades, lo que permite diferencia entre cuatro clases diferentes de tráfico, como se muestra en la Figura 2.1. Cada  $i$ -th categoría de acceso tiene su propia cola de transmisión, caracterizada por el ajuste de los parámetros de acceso:  $AIFSN_i$  (Arbitrary Inter-Frame Space Number),  $CW_{min,i}$  (Minimum Contention Window),  $CW_{max,i}$  (Maximum Contention Window) y  $TXOP_i$  (Transmission Oportunity). Una estación que quiera el canal para transmitir tiene que esperar hasta que el canal esté vacío durante un periodo de tiempo  $AIFS_i = SIFS + AIFSN_i \cdot \sigma$ , donde  $\sigma$  es el SlotTime o tamaño de slot en el proceso de backoff. Si el canal se encuentra ocupado, la estación deberá activar su mecanismo de contienda, y deberá esperar una ventana de contienda de  $W_i$  slots, donde  $W_i$  es calculada siguiendo una variable uniformemente distribuida escogida en el rango  $[0, CW_i - 1]$  para la  $i$ -th categoría de acceso.

El límite superior de  $W_i$ , crece exponencialmente con cada transmisión sin éxito, empezando en  $CW_{min,i} - 1$  y finalizando en  $CW_{max,i} - 1$ . Una vez que se alcanza el límite superior  $CW_{max,i} - 1$ , este permanece sin cambiar hasta que se alcanza el máximo número de retransmi-

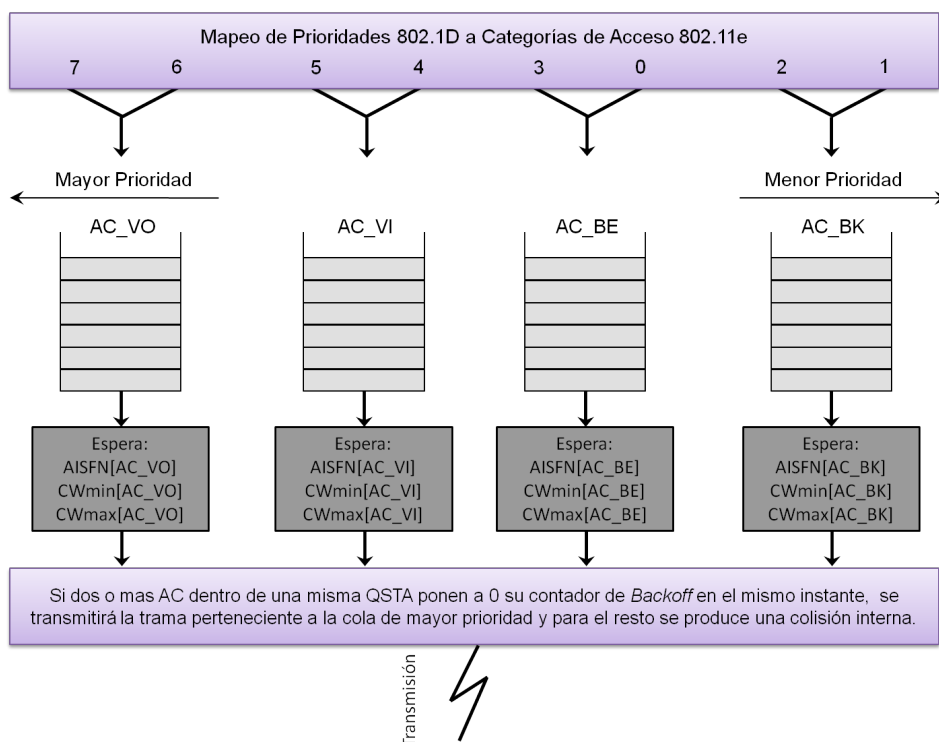


Figura 2.1: Esquema de EDCA

siones para cada clase. Si en algún momento durante el periodo de *backoff* el canal se escucha ocupado, la cuenta atrás es detenida y continua una vez el canal se escucha vacío durante un periodo de tiempo  $AIFS_i$ . Cuando la cuenta atrás finaliza la estación transmite y espera a recibir un ACK del receptor enviado después de que el receptor espere un tiempo igual a SIFS, que confirmará la correcta recepción de la trama. Si el ACK llega antes de un tiempo definido como ACKTimeout<sup>2</sup>, la transmisión se considera exitosa, pero si el ACK no es recibido antes de ese tiempo se empieza una retransmisión de la trama siguiendo el mismo proceso. Este proceso se repite tantas veces como indique el límite máximo de retransmisiones<sup>3</sup>.

Una colisión tiene lugar cuando dos o mas estaciones transmiten simultáneamente. Si dos AC's diferentes intentan transmitir simultáneamente en la misma estación, se produce una colisión interna que permite que la clase más prioritaria transmita, mientras que la otra es tratada como si ocurriera una colisión real.

Finalmente, si la transmisión es exitosa, la estación puede continuar enviando paquetes durante un límite de tiempo acotado por el parámetro  $TXOP_i$ <sup>4</sup>. Cuando el  $TXOP_i = 0$ , quiere decir la estación podrá transmitir una sola trama cuando gane el acceso al canal.

<sup>2</sup>ACKTimeout es el tiempo que se espera por un ACK tras el envío de una trama de datos. Transcurrido ese tiempo, se retransmite o se abandona.

<sup>3</sup>Aunque el estándar define número máximo de retransmisiones o *dot11LongRetryLimit* igual a siete, En MadWiFi este valor está fijado a diez

<sup>4</sup>El parámetro TXOP limit es expresado como un campo de 11-bit en unidades de  $32\mu s$ , y el máximo es definido como  $65536\mu s$ . En el driver MADWIFI su valor está limitado a  $8192\mu s$

Las cuatro AC que define el estándar son, de mayor a menor prioridad: AC\_VO (voz), AC\_VI (video), AC\_BE (*best-effort*) y AC\_BK (*background*). La Tabla 2.2.1 muestra los valores por defecto de los diferentes parámetros, en función de la categoría de acceso.

AC	CW_min	CW_max	AIFSN	TXOP limit		
				For PHYs defined in Clause 15 <sup>1</sup> and Clause 18 <sup>2</sup>	For PHYs defined in Clause 17 <sup>3</sup> and Clause 19 <sup>4</sup>	Other PHYs
AC_BK	aCWmin	aCWmax	7	0	0	0
AC_BE	aCWmin	aCWmax	3	0	0	0
AC_VI	(aCWmin+1)/2-1	aCWmin	2	6.016 ms	3.008 ms	0
AC_VO	(aCWmin+1)/4-1	(aCWmin+1)/2-1	2	3.264 ms	1.504 ms	0

Tabla 2.1: Parámetros EDCA por defecto del estándar IEEE 802.11e [1].

Por último, es importante mencionar que se podría ofrecer QoS parametrizada a través del mecanismo EDCA cuando se utiliza un mecanismo de control de admisión de tráfico, a través de la trama de especificación de tráfico (TSPEC - Traffic SPECification).

La especificación de tráfico (TSPEC) 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. El control de admisión en una red IEEE 802.11e, puede ser usado para regular el ancho de banda disponible, así como para garantizar a una estación la cantidad de tiempo que puede tener acceso al canal. En este caso, el módulo HC que se encuentra en los puntos de acceso QAP, es utilizado para administrar el control de admisión en la red. Existen dos mecanismos de control de admisión distintos, en función del tipo de mecanismo del acceso al medio que se esté usando. Así se define un mecanismo de control de admisión para el modo distribuido EDCA, y otro para el modo centralizado o HCCA.

Aunque en general, el algoritmo de control de admisión depende de los vendedores, el estándar IEEE 802.11e define los diferentes procedimientos de control a ejecutar en las diferentes estaciones, donde se especifica el uso de TSPEC para este propósito tanto en EDCA como en HCCA.

<sup>1</sup>Clause 15: DSSS PHY (original 802.11)

<sup>2</sup>Clause 18: HR/DSSS PHY (802.11b)

<sup>3</sup>Clause 17: (802.11a)

<sup>4</sup>Clause 19: (802.11g)

## 2.3. Provisión de QoS en el estándar IEEE 802.16-2009 (WiMAX)

En el estándar IEEE 802.16-2009 [10], se define el funcionamiento en una topología celular bajo la modalidad punto a multipunto, que será que se utilizará en el desarrollo de esta estrategia de integración, debido a que el mundo de la industria ha optado únicamente por la fabricación de equipos que implementen este modo de operación.

En el modo punto multipunto, se tiene una estación principal denominada estación base (*BS, Base Station*) y varias estaciones esclavas denominadas estaciones suscriptores (*SS, subscriber stations*), las cuales también se pueden llamar *CPE (Customer Premises Equipment)*. Dicha BS es la encargada de proveer la inteligencia en la red, además de proveer todos los servicios a las SS. La Calidad de Servicio provista por esta tecnología es siempre parametrizada.

En éste estándar la transmisión de tramas *unicast* (destinatario único) en la capa MAC está orientada a conexión y es la encargada de proveer la QoS. Ésta capa proporciona inteligencia a la capa física, para de esta manera asegurar ciertos requisitos de QoS, como retardo o *jitter*, mediante la asignación dinámica del ancho de banda.

El mecanismo que utiliza la capa MAC para proveer la QoS se denomina *Grant/Request*, en él, las estaciones subscriptoras (SS) deben solicitar (*request*) a la estación base (BS) el establecimiento de conexión para un determinado ancho de banda (entendido como capacidad del canal en bps). La BS, en función del ancho de banda disponible, decide si acepta la conexión (*grant*) o no.

Para ello, el funcionamiento de la capa MAC se divide en tres partes: La subcapa de convergencia específica de servicio (service specific Convergence Sublayer - CS), la subcapa parte Común del MAC (Mac Common Part Sublayer - MAC CPS), y la capa de seguridad o privacidad (Security Layer).

*Convergence Sublayer (CS)*: Se encarga de transformar los datos de las redes externas y pasarlos a la MAC CPS convertidos en Unidades de datos de servicio (Service Data Units - SDU), que son las unidades de datos que se transfieren entre capas adyacentes. Se encuentra sobre la MAC CPS y utiliza los servicios provistos por ésta.

*MAC Common Part Sublayer (MAC CPS)*: Es el core de la toda la capa MAC, provee los servicios de acceso al sistema, asignación de ancho de banda, establecimiento y mantenimiento de la conexión.

*Security Sublayer*: Presta los servicios de autenticación, intercambio seguro de claves y cifrado. Permite proveer a los usuarios un servicio de banda ancha seguro a través de su conexión fija mediante el cifrado de las conexiones, y al operador protegerse contra las conexiones no autorizadas forzando el cifrado.

Las conexiones están caracterizadas por ser unidireccionales, y tienen asociado un identifi-

cador de conexión único denominado CID (*Connection Identifier*), de 16 bits, que las distingue unívocamente de las demás. Por lo tanto, para establecer un enlace bidireccional entre la BS y una SS serán necesarias dos conexiones, cada una con un CID concreto.

Las conexiones de datos en WiMAX pueden ser de dos tipos: de gestión o de transporte. Las primeras son asignadas a cada SS por la BS y se establecen una única vez cuando al SS se incorpora a la red, y las segundas se pueden establecer en cualquier momento, y son solicitadas por la SS a la BS, con unos determinados parámetros de QoS de acuerdo a sus necesidades.

Estas conexiones definen en que forma han de ser tratados los distintos tráfico de datos provenientes de la misma SS para cumplir con sus requisitos de QoS. Hasta que no están establecidas las conexiones de gestión, no se puede solicitar ninguna conexión de transporte, y hasta que éstas no están establecidas no pueden transmitirse datos.

Para proveer calidad de servicio, cada conexión de transporte está asociada a un flujo de servicio (relación 1 a 1). Los flujos de servicio están definidos en la BS y contienen un conjunto de parámetros con las características de QoS para un tipo de tráfico. Algunos de estos parámetros son retardo, caudal o *jitter*. El conjunto de parámetros de un flujo de servicio sólo puede ser uno de entre los que tiene la BS configurados. En el establecimiento de la conexión de transporte, la SS envía un mensaje DSA REQ (*Dynamic Service Addition Request*) conteniendo el conjunto de parámetros deseado. La BS comprueba que ese conjunto de parámetros coincide con alguno de los que tiene configurados y, si dispone de recursos suficientes para garantizar su QoS, lo confirma con un mensaje DSA RSP (*Dynamic Service Addition Response*). Si no existen recursos acordes al conjunto de parámetros solicitados, la BS puede proponer otro conjunto de parámetros alternativo en el mensaje DSA RSP. Entonces la SS debe decidir si el nivel de calidad ofrecido le es suficiente o no. En caso afirmativo, envía un DSA ACK, asintiendo la conexión.

### 2.3.1. Mecanismo de Garantía de QoS

El método principal para asegurar QoS, es asociar los paquetes entrantes en la subcapa MAC CS, a un flujo de servicio identificado por su SFID y CID. Para ello, los paquetes provenientes de capas superiores deben ser asignados a cada una de las conexiones establecidas. En este sentido, la subcapa CS realiza la clasificación de un paquete que viene de capas superiores, y lo asocia con un flujo de servicio existente (si cumple los criterios definidos por la conexión), o solicita la creación de una nueva conexión para poder transmitir. Varios clasificadores pueden ir asociados al mismo flujo de servicio (así como muchos flujos de aplicación pueden ir asociados a un flujo de servicio). El clasificador de prioridad (*Classifier Priority*) es utilizado para designar el orden de los clasificadores de paquetes. Los flujos de servicio (que como ya sabemos, tienen definidos unos requerimientos de QoS), tienen asociado en base a sus requerimientos de QoS, un servicio de planificación. En este sentido, el propósito principal de las características de cada flujo de servicio es definir el orden y la planificación de su transmisión en el interfaz con el medio radioeléctrico. Esta planificación se lleva a cabo de formas distintas en el canal de bajada y en el de subida.

El canal de bajada (DL) lo gestiona directamente la BS, mientras que para la planificación

del canal de subida (UL) la BS utiliza un mecanismo conocido como Grant/Request para proporcionar a cada SS el ancho de banda requerido, o las oportunidades necesarias para poder solicitarlo cuando lo necesite.

En la práctica, WiMAX lleva esto a cabo a través de los servicios de planificación. Los servicios de planificación representan los mecanismos de manejo de paquetes, soportados por el planificador MAC CPS, para el transporte del tráfico de una conexión de datos. El estándar IEEE 802.16-2009 especifica cinco diferentes tipos de servicio con la finalidad de cumplir los requerimientos de QoS de las aplicaciones multimedia:

- ***Unsolicited Grant Service*** (UGS): Diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real (con estrictos requerimientos de retardo), con paquetes de datos de tamaño fijo, transmitidos en intervalos periódicos de tiempo como por ejemplo VoIP sin supresión de silencios.
- ***Real-Time Polling Service*** (rtPS): Diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real (con requerimientos menos exigentes de retardo) que generan paquetes de longitud variable transmitidos en forma periódica, este tipo de servicios son dinámicos en su naturaleza, como vídeo MPEG (*Moving Pictures Experts Group*) o VoIP con supresión de silencios.
- ***Extended Real-Time Polling Service*** (ertPS): Es un servicio de planificación que se basa en la eficiencia de UGS y rtPS. En este caso, la BS puede otorgar concesiones unicast de forma no solicitada como a UGS, mejorando el retardo de los requerimiento del ancho de banda. Sin embargo, mientras que las asignaciones de UGS tienen un tamaño fijo, las asignaciones ertPS son dinámicas. Este servicio esta diseñado para soportar flujos de servicio en tiempo real que generen paquetes de tamaño variable en forma periódica, tales como VoIP con supresión de silencios.
- ***non Real-Time Polling Service*** (nrtPS): Diseñado para flujos de servicio que no son en tiempo real, que generan ráfagas de paquetes de datos de tamaño variable, como el flujo de servicio FTP (*File Transport Protocol*). Lo habitual es que los servicios transportados en estas conexiones toleren mayor retardo y sean prácticamente insensibles a la variación del mismo. Este servicio se ajusta muy bien para el acceso a Internet que requiera ciertos mínimos como FTP.
- ***Best Effort*** (BE): Diseñado para flujos de datos que no requieren un nivel de servicio mínimo y que pueden ser transmitidos cuando existe ancho de banda disponible, estos flujos no proveen ninguna garantía de que los datos sean entregados. Por ejemplo, la navegación por Internet.

Estos servicios de planificación se implementan usando garantías de ancho de banda no solicitadas, sondeos, y procedimientos de acceso al medio en contienda. Los mecanismos se definen en el estándar de tal forma que el fabricante pueda optimizar el rendimiento, utilizando distintas combinaciones de esta técnicas de asignación de ancho de banda, manteniendo a la vez compatibilidad con el estándar.

## 2.4. Provisión de QoS en capa IP

A continuación se describirán los mecanismos que existen para la provisión de QoS en la capa IP, pues como se ha mencionado previamente para garantizar la calidad de servicio en una red híbrida extremo a extremo, hay que proporcionar un tratamiento diferenciado a los distintos tipos de tráfico en capas superiores como la capa IP o la capa de aplicación.

En la capa IP, existen diferentes esfuerzos realizados por diferentes comités de estandarización. Entre ellos la de mayor relevancia es la propuesta realizada por el IETF (Internet Engineering Task Force), donde debemos destacar dos grupos de trabajo que han dado lugar a propuestas con diferentes enfoques para la provisión de QoS en Internet. Por un lado apoyándose en la prereserva de recursos o QoS parametrizada aparecería el grupo de servicios integrados (Intserv) y por otro basándose en la priorización de tráfico o QoS priorizada, tendríamos el grupo de servicios diferenciados (Diffserv).

La primera de las dos arquitecturas arriba mencionadas, **IntServ**, 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, en este caso el protocolo RSVP (*Resource Reservation Protocol*)[15]. El principal problema de esta arquitectura es la necesidad de mantener información sobre cada flujo en todos los nodos de la red, lo cual lleva a problemas de escalabilidad, además, se debe tener en cuenta que cada nodo de conmutación tendrá que almacenar un listado de todos los flujos activos y los correspondientes recursos asignados y que 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, además la implementación del protocolo RSVP es compleja pues requiere que cualquier aplicación que inyecte tráfico a la red sea capaz de transmitir información mediante el mismo protocolo, de tal forma que se pueda realizar la reserva de recursos, lo que hace a este mecanismo muy complejo y poco flexible a la hora de realizar la integración. 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.

Por los motivos anteriormente expuestos se eligió al modelo de servicios diferenciados como el mecanismo que se utilizará en la capa IP, dentro de la estrategia de integración. A continuación se detalla su funcionamiento.

### 2.4.1. Servicios Diferenciados: DiffServ

El modelo de servicios diferenciados (Differentiation Services - DiffServ) [16] 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 prereservas se realizan por agregados de tráfico, en lugar de por flujos. Esta prereserva 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.

En la arquitectura Diffserv se definen dos equipos de conmutación diferenciados que se pueden observar en la Figura 2.2, los 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.

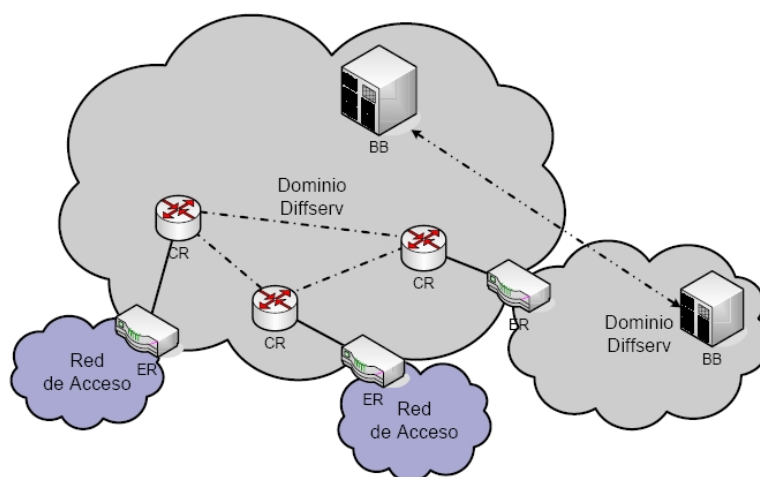


Figura 2.2: Elementos que conforman un dominio Diffserv

Para la identificación de los diferentes agregados de tráfico se define un código llamado DSCP (*Differentiated Services Code Point*) del campo DS de las cabeceras IP (hasta el año 1998, el *byte ToS (Type-of-Service)* [17]), definido en la RFC 2474 [18]). Esta información se mapeará en el campo TOS (Type of Service) en el caso de utilizar IPv4, y en el campo Traffic Class cuando se utilice IPv6. En la Figura 2.3 se puede observar como se conforma este campo.

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 (Per Hop Behaviour - PHB), de forma que se estandarizan determinados tipos de tratamientos

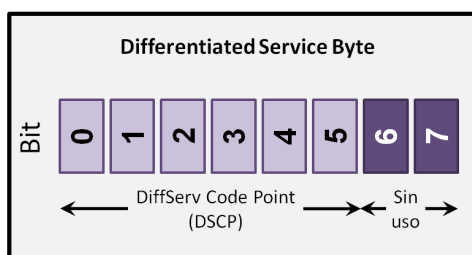


Figura 2.3: Campo de identificación Diffserv DS

según el tipo de tráfico que se pretenda encajar en ellos. Existen tres perfiles PHB definidos en el modelo Diffserv:

- *Expedited Forwarding (EF)* se trata de aquellos flujos de tráfico que requieran un caudal mínimo asegurado, así como un retardo limitado y un *jitter* determinado. Este perfil se ajusta a aplicaciones para tráfico en tiempo real y máxima prioridad, como puede ser audio/vídeo conferencia. El perfil PHB EF está identificado por el código DSCP: 101110.
- *Assured Forwarding (AF)* pensado 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 y dentro de cada clase establece tres prioridades de descarte. Así, AF define un conjunto de 12 posibles servicios. Si identificamos cada servicio con dos subíndices AF<sub>xy</sub>, 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 2.2

Prioridad de descarte	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Baja	0001010	010010	011010	100010
Media	001100	010100	011100	100100
Alta	001110	010110	011110	100110

Tabla 2.2: Códigos DSCP para el perfil AF

- *Best effort (BE)* aunque no pertenece exclusivamente al modelo Diffserv, este perfil se utiliza para el tráfico que no tiene requisitos de QoS. 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.

El tratamiento del tráfico en los nodos ofrece determinadas características de QoS 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.

Con DiffServ se tiene el inconveniente de que es imposible conocer los recursos que se tendrán en un momento dado, ni se podrá garantizar la QoS a lo largo de todo el camino que tenga que recorrer un flujo, pero tiene la ventaja de ser escalable y flexible, lo que hará sencilla su implementación.

## 2.5. Trabajos Previos

Durante el desarrollo de esta investigación, se han identificado varios trabajos que se han enfocado en estudiar la coexistencia e interoperabilidad entre IEEE 802.16 e IEEE 802.11e, de los cuales los más interesantes para el desarrollo de este PFM se presentan a continuación.

Los primeros trabajos de investigación sobre integración entre estas dos tecnologías surgieron en el año 2005 tras la publicación de la enmienda 802.11e, los cuales se centraron principalmente en establecer, de forma descriptiva un mapeo entre las diferentes clases de tráfico en ambas redes y en definir una arquitectura para la red híbrida. Entre ellos, podemos encontrar trabajos como [19] en el que los autores proponen la creación de una pasarela radio (Radio Gateway RG) interoperable entre IEEE 802.11e e IEEE 802.16, con una propuesta de mapeado parametrizado entre las clases de tráfico IEEE 802.11e a los flujos de servicio IEEE 802.16, cuyo sistema esta diseñado para mapear los requerimientos de QoS de una aplicación con origen en una red IEEE-802.11e hacia una red IEEE 802.16. Sin embargo, no ofrecen detalles sobre como realizar el mapeado ni investigan el rendimiento de la arquitectura propuesta.

Un trabajo similar es el presentado en [20], donde los autores analizan la interacción entre las diferentes capas y redes que son necesarias para proveer QoS. En dicho artículo se propone un mapeado de clases de tráfico para IEEE 802.16 e IEEE 802.11e que opera con el modelo DiffServ en capa IP. Pero al igual que en el trabajo anterior, no provee información detallada sobre como realizar la integración ni tampoco se realiza un análisis de rendimiento.

Los trabajos encontrados a partir del año 2006, presentan un mayor nivel de detalle sobre las posibles opciones para conseguir la integración, así por ejemplo encontramos trabajos como [21] en donde los autores introducen una estación base coordinadora híbrida (Base Station Hybrid Coordinator - BSHC) que combina el concepto de una BS IEEE 802.16 y un coordinador híbrido 802.11e en modo HCCA, ambos operando en la banda de frecuencias de 5GHz y con una modulación OFDM similar, de tal forma que la BSHC es capaz de utilizar el mismo canal para comunicarse con las estaciones 802.11e HCCA y 802.16. Esta interoperabilidad se basa en integrar las secuencias de transmisión del MAC de 802.11e-HCCA dentro de la estructura de la trama MAC de 802.16 e introducir periodos de espera entre dos tramas consecutivas de WiMAX, lo que permite conseguir la convivencia entre los dos estándares sin que se produzcan interferencia en la capa física. Sin embargo, la implementación es muy compleja y difícilmente implementable, además los resultados indican un rápida degradación del 80 % en el caudal cuando el número de estaciones base se incrementa de 1 a 4.

Por otro lado, en [22] introducen un nuevo punto de acceso integrado denominado WMAN/WLAN AP (WWAP), el cual combina una WMAN SS y un WLAN AP con la finalidad de extender la cobertura WMAN y garantizar la QoS extremo a extremo. El mecanismo de interoperabilidad que emplea el WWAP se llama Ethernet-bridging y se basa principalmente en el uso de las capas de convergencia de ambos estándares, realizando un tratamiento adecuado de tramas y un mapeo de clases de tráfico entre las diferentes tecnologías.

En [23] los autores presentan un protocolo para soportar una QoS integrada en redes convergentes que comprendan sistemas WiMAX y WiFi. Pero el mecanismo propuesto requiere importantes cambios en los protocolos de control de ambas tecnologías. Otro ejemplo se presenta en [24] en donde, un nodo móvil WiMAX-WiFi escanea y conecta al usuario con la mejor red disponible, la cual puede proveer mejor caudal y disminuir las pérdidas. Sin embargo, la arquitectura necesita nodos móviles equipados con la capa MAC y PHY tanto de WiFi, como de WiMAX, lo que hace a estos equipos complejos y de alto coste para el usuario final.

Aunque las ideas expuestas en [21], [22],[23] y [24] son interesantes, las soluciones propuestas no dejan de ser complejas y difícilmente implementables. Por otro lado, las propuestas hechas en [19] y [20], no proporcionan un nivel de detalle adecuado.

Ya en el año 2007, hay trabajos como [25] y [26], donde se plantea la negociación de QoS entre un AP inalámbrico híbrido IEEE 802.16/802.11 que utiliza distintas bandas de frecuencia para cada uno de los estándares con la finalidad de evitar interferencias, este AP es capaz de comunicarse con estaciones 802.16 y/o estaciones 802.11e. La red permite satisfacer las garantías de QoS de todos los usuarios de la red, a través de un planificador de ancho de banda basado en un modelo de teoría de juegos, e incluye un control de admisión para mantener las garantías de ancho de banda asignadas.

[27] presenta un nuevo método para emular WiMAX-mesh sobre redes WiFi, mediante un driver mesh 802.16 mesh que se agrega al driver 802.11 y la capa de red, de esta forma cada paquete 802.16 es embebido dentro de un paquete broadcast 802.11b y como resultado los paquetes pueden ser registrados en los equipos 802.16-mesh. Este método sólo requiere de cambios en el software de los nodos que utilizan 802.11

Los trabajos de [28] y [29] se centran en investigar la interoperabilidad entre WLAN y WMAN, mediante la preservación de los requerimientos de QoS de las sesiones de usuarios que se están moviendo de redes WLAN a redes WMAN, dando por hecho que las redes se pueden comunicar entre sí. Proponen un mapeo de las AC de WiFi a los FS de WiMAX y un modelado teórico de reserva de capacidad para datos y voz en red híbrida, pero no dan más detalle de la propuesta.

En la solución presentada en [25] y [26] los autores parecen considerar únicamente la problemática del ancho de banda entre los distintos flujos de la red, sin considerar retardo, *jitter* o paquetes perdidos. En tanto que las soluciones propuestas en [28] y [29] solo centran su investigación en la preservación de QoS entre estas dos tecnologías, dando por hecho que se comunican entre sí.

Más recientemente, en el año 2008, se encontraron trabajos como [30], en el cual los autores plantean una arquitectura para la integración entre IEEE 802.11e-HCCA e IEEE 802.16 (d,e), cuyo mecanismo es transparente a las capas MAC y PHY de ambas tecnologías. Para lo cual proponen una *Interface Gateway Architecture (IGW)*, que establece dos tipos de mapeado: 1) mapeado a nivel de control en el que la arquitectura simplemente contempla la integración entre la QoS parametrizada en 802.11e-HCCA y el intercambio de mensajes necesarios en WiMAX para generar una conexión de datos y 2) mapeado de datos que utiliza la flexibilidad de las subcapas de convergencia MAC de ambos estándares por medio de los estándares 802.1P (prioridad) y 802.1D (puenteo). El estudio se complementa con un modelado teórico del tráfico, del procesamiento y del canal que les permite obtener estimaciones de las prestaciones del sistema con base en simulaciones.

Un trabajo similar al anterior es el presentado en [31] en donde se propone un modelo de integración de WLAN y WiMAX en un CPE basado en el mapeo de clases tráfico y señalización que gestiona las conexiones integradas. Para lo cual introducen una Entidad de Gestión Integrada (IME) en el CPE, que provee integración a nivel MAC de ambas tecnologías mediante un algoritmo de planificación adaptativa el cual proporciona un límite de retardo en el uplink y un límite de almacenamiento temporal (buffer) que permite la correcta provisión de QoS en la red híbrida, donde ofrecen resultados a través de simulación para distintas clases de tráfico.

También se han encontrado trabajos que no hablan concretamente de una integración entre WiFi y WiMAX, sin embargo aportan ideas interesantes con respecto a la interoperabilidad entre estas redes, entre ellos podemos mencionar a [32] que en el 2008, expone una técnica de sincronización que permite a los dispositivos WiFi y WiMAX comunicarse uno con el otro, mediante la implementación de una pequeña capa adicional entre la capa MAC y la PHY en ambas tecnologías, la cual se encarga realizar una sincronización alternada y la traducción de tramas de un estándar a otro, sin mencionar nada con respecto a la preservación de QoS en la red híbrida.

[33] presenta un estudio experimental para medir retardo, throughput y pérdida de paquetes para diferentes códecs de VoIP en una red híbrida WiMAX/WiFi formada por varios puntos de acceso 802.11g conectados a estaciones suscriptoras WiMAX mediante la capa IP, pero no plantean ninguna integración a nivel MAC de las tecnologías ni tampoco mecanismos para garantizar la QoS extremo a extremo.

Finalmente, los últimos estudios encontrados son del año 2009, entre los cuales es interesante mencionar el trabajo expuesto en [34] en el cual los autores proponen una arquitectura orientada a conexión para soportar la integración de las tecnologías WiFi y WiMAX en redes inalámbricas de banda ancha. Dicha arquitectura utiliza un nuevo Punto de Acceso Inalámbrico, diseñado como un AP WiMAX/WiFi denominado  $W^2$ -AP el cual gestiona la interfaz híbrida para combinar efectivamente las dos tecnologías; este dispositivo cuenta con una capa de convergencia MAC modificada en su interfaz WiFi diseñada para embeber las funciones MAC del suscriptor 802.16 dentro de la MAC original 802.11. Para que los dispositivos terminales se puedan conectar al  $W^2$ -AP se debe de actualizar el software de su tarjeta de red. De tal forma que conjuntamente, el  $W^2$ -AP y la funcionalidad de MAC extendida de las tarjetas 802.11 habilitan a cada punto de acceso WiFi para soportar transmisiones orientadas a conexión y servicios diferenciados. El

estudio se complementa con un mecanismo que controla y asigna el ancho de banda disponible en la red híbrida denominado THBA (Two-level Hierarchical Bandwidth Allocation). La arquitectura integrada habilita el uso de operaciones de un protocolo común entre los componentes de las redes WiMAX y WiFi, de tal forma que la red WiMAX provee un servicio de red de acceso de banda ancha a múltiples dispositivos W<sup>2</sup>-AP y SS en una topología PMP, en el cual las redes WiFi se conectan a la BS WiMAX a través del W<sup>2</sup>-AP.

Otro trabajo similar, es el que se presenta en [35]. En él, los autores proponen un router Wi-Fi/WiMAX (WWR) con dos interfaces radio que integra las funcionalidades de una BS WiMAX y un AP WiFi además funcionar como un router, este dispositivo es útil como una interfaz integrada para el mapeo entre diferentes clases de tráfico y la traducción de protocolos en la capa MAC, es decir, las MAC PDU de ambos estándares son convertidas entre una y otra, sin embargo, no explican claramente como lo hacen ni tampoco establecen mecanismos que garanticen QoS, sólo interoperabilidad. Demostrando el rendimiento del equipo mediante simulaciones.

Y finalmente el trabajo presentado en [36] expone una propuesta de asignación dinámica del espectro entre WiFi/WiMAX en caso de una integración y compartición del espectro de frecuencias. Método que permite que WiFi utilice una banda del espectro de WiMAX temporalmente en una red integrada.

Los trabajos aquí presentados nos proporcionan un “*background*” importante, que nos permitirá establecer las bases de las cuales realizar la estrategia de integración.

# Capítulo 3

## Objetivo

El objetivo del presente PFM es diseñar una estrategia para integrar las tecnologías WiMAX (802.16) y WiFi (802.11e-EDCA), de tal forma que se proporcione calidad de servicio extremo a extremo en una red heterogénea que permita la provisión económica y técnicamente eficiente de servicios digitales de banda ancha en entornos rurales.

Para lograr el objetivo planteado, se debe tomar en cuenta que ambos estándares presentan ventajas y desventajas en el despliegue de redes de banda ancha en zonas rurales, y que la unión de ambas tecnologías debe permitir la provisión de QoS en una red heterogénea, con la finalidad de evitar que la congestión en la red afecte a las aplicaciones que requieran un especial ancho de banda y/o ciertas características de retardo y *jitter*, como las comunicaciones de voz o las videoconferencias. Además, se pueden incorporar modelos como DiffServ a nivel IP, con lo cual se obtendría un mejor rendimiento de la red híbrida.

En la actualidad, aunque los costes de los equipos WiMAX certificados se ha reducido, estos aún siguen siendo más elevados en comparación con los de los equipos WiFi, y más aún cuando para su despliegue se requieran varias estaciones base, pues no hay que olvidar que la implementación más generalizada de estos equipos es el modo punto multipunto; esto representa una desventaja para el despliegue de redes en zonas rurales de países en vías de desarrollo, motivo por el cual surge la necesidad de explorar la adaptación y combinación de tecnologías como WiFi y WiMAX en bandas no licenciadas, de tal forma que se logre disminuir la cantidad de estaciones base, manteniendo la calidad de la red, lo cual disminuirá los costes de despliegue para su uso adecuado en el contexto de zonas rurales aisladas.

En otras palabras, el objetivo que se persigue es buscar la viabilidad de los despliegues de acceso banda ancha en entornos rurales, creando un nuevo producto resultado de la convergencia de tecnologías, colaborando así con la disminución de la brecha digital.





# **Parte II**

# **METODOLOGÍA**



# Capítulo 4

## Metodología de trabajo y medios materiales

Una vez conocida la problemática, el contexto y el objetivo concreto que se persigue en este PFM, conviene detallar la metodología que se seguirá para resolver el problema planteado, para lo cual en la primera parte de este capítulo se describen los pasos que se han seguido. El segundo apartado proporciona la descripción de las características técnicas de los medios materiales utilizados en el proyecto y finalmente el tercer apartado presenta las herramientas software que han sido utilizadas.

### 4.1. Metodología de trabajo

Como en todo proyecto de investigación, en este PFM se siguió un procedimiento definido con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados en el Capítulo 3, los pasos que se siguieron se describen a continuación:

#### 1. Recopilación de información.

La primera fase del proyecto se dedicó a la búsqueda de información relacionada con el tema de la investigación, es decir, métodos de integración de QoS entre IEEE 802.11e EDCA e IEEE 802.16, para lo cual se realizó una búsqueda de artículos científicos y/o desarrollos comerciales que nos pudieran proporcionar información respecto a una posible forma de abordar el problema en cuestión, a la vez que obtendríamos el estado actual de este tema de investigación. El resumen de esta búsqueda bibliográfica se resume en el Apartado 2.5 del capítulo anterior. En cuanto a los desarrollos comerciales, éstos en la actualidad son pocos y son equipos que únicamente incluyen una interfaz radio WiFi dentro de un CPE, sin especificar de forma explícita ningún mecanismo de QoS entre ambas tecnologías, motivo por el cual fueron descartados en esta primera fase del proyecto y no se mencionan en esta memoria.

#### 2. Estudio de las tecnologías involucradas.

Posteriormente, se tuvieron que estudiar y analizar la provisión de QoS en cada una de las tecnologías involucradas, es decir, la parte referente a la QoS de los estándares IEEE 802.11e modo EDCA e IEEE 802.16-2009 (WiMAX), así como los diferentes mecanismos de la capa IP para la provisión la calidad de servicio y una posible forma de integrar

ambas tecnologías. Esto nos ayudó a entender de mejor manera la provisión de QoS en cada tecnología y a analizar los trabajos previos encontrados.

### 3. Desarrollar la propuesta de integración.

Una vez que se ha conocido el estado del arte del tema de investigación, en el siguiente capítulo de este PFM se describe la estrategia de investigación propuesta para la integración de los dos estándares involucrados y la capa IP.

### 4. Diseño de pruebas de verificación.

Desarrollada la propuesta de investigación, el siguiente paso es el diseño de una batería de pruebas que validen el buen funcionamiento de la estrategia propuesta, para lo cual se deben definir los escenarios que se van a utilizar y las limitaciones que tienen tanto los equipos comerciales con los que se trabaja como la misma propuesta en sí.

### 5. Resultados

Finalmente se realizan en un entorno de laboratorio con equipos comerciales las pruebas diseñadas y se obtienen resultados que permiten cuantificar el funcionamiento de la propuesta de integración presentada.

## 4.2. Medios materiales

Para poder realizar este proyecto se utilizaron diversos equipos, los cuales fueron necesarios para la validación de la estrategia de integración en la etapa de pruebas. La descripción de las características técnicas de cada uno de ellos se menciona a continuación:

### ■ Equipos WiMAX

Los equipos WiMAX seleccionados para llevar a cabo este proyecto son del fabricante Alentia Systems y se trata de una estación base y una suscriptor, ambas configurables mediante su interfaz Web. Sus características se describen en la Tabla 4.1

Equipo WiMAX	Descripción
Estación Base (BS)	Una Estación Base WiMAX ARBA-556, con versión de <i>firmware</i> : 3.0.4978, que opera en las bandas no licenciadas ETSI/FCC de 5 GHz, basada en el estándar IEEE 802.16-2004. Una antena sectorial.
Estación Suscriptor (SS)	Una unidad de usuario WiMAX ARBA-550, totalmente compatible con la estación base ARBA-550.

Tabla 4.1: Descripción Equipos WiMAX.

### ■ Equipos WiFi

Los tres equipos WiFi utilizados son routers construidos mediante ordenadores empujados cuyas características se describen en la Tabla 4.2, al igual que los complementos

necesarios para el funcionamiento de estos como router WiFi. Cabe mencionar que sólo el equipo configurado como punto de acceso (AP) forma parte del equipo híbrido. Los otros dos routers serán las estaciones cliente asociadas al AP. Estos equipos son configurables mediante ssh.

Equipo WiFi	Descripción
Punto de Acceso (AP)	Placa Alix 2C2: Ordenador empotrado con slot para Compact Flash (CF) para el sistema operativo, dos slots miniPCI para radios WiFi, dos puertos Ethernet y uno serie. Un tarjeta radio 802.11a/b/g miniPCI, Memoria CF de 1 Gbit, un pigtail y una antena dipolo de 2 dBi. En este ordenador se instaló el sistema operativo Voyage Linux v0.6.5 con kernel 2.6.30 que provee la implementación del mecanismo IEEE 802.11e modo EDCA, mediante el driver MadWiFi versión madwifi-trunk 0.9.4+r4099.
Estaciones (STA's)	Dos placas WRAP 2E: Ordenadores empotrados con slot CF para el sistema operativo, dos slots miniPCI para radios WiFi, dos puertos Ethernet y uno serie. Dos tarjetas radio 802.11a/b/g miniPCI, 2 Memorias CF de 1 Gbit, 2 pigtails y dos antenas dipolo de 2 dBi, que fueron instaladas de la misma forma que el AP.

Tabla 4.2: Descripción de Equipos WiFi.

- Ordenadores y resto de equipo Hardware

Se utilizó un equipo de sobremesa que estará conectado en todo momento a la BS-WiMAX y dos equipos portátiles que estarán conectados a las estaciones WiFi, cuyas características se describen en la Tabla 4.3, además fue necesario el uso de cables y hubs para poder realizar la interconexión de los equipos.

Otro hardware	Descripción
Ordenadores	Tres ordenadores <sup>1</sup> con sistema operativo Ubuntu 9.10 con kernel 2.6 y puerto Ethernet.
Cables Ethernet y 3 hubs	Necesarios para implementar los escenarios de pruebas planteados en este PFM.

Tabla 4.3: Descripción de ordenadores y otro equipo Hardware.

Las especificaciones técnicas de los equipos descritos en este apartado se presentan en el Apéndice B.

<sup>1</sup>En adelante, se podrá hacer referencia al equipo de sobremesa y a los dos portátiles, simplemente llamándolos ordenadores.

### 4.3. Herramientas software

Además de los equipos descrito en el Apartado anterior, se utilizaron algunas herramientas de software durante la realización de pruebas y el procesamiento de los resultados, así como para la configuración de los equipos, los cuales se mencionan a continuación.

#### ■ Generador de tráfico D-ITG

El *Distributed Internet Traffic Generator*, al que llamaremos en adelante D-ITG, es un software para la generación de tráfico, desarrollado por el "Dipartimento di Informatica e Sistemistica" de la Università degli Studi di Napoli Federico II [37].

El D-ITG es un conjunto integrado de herramientas que presenta varias características que la hacen una herramienta flexible y robusta, ya que permite generar distintos tipo de tráfico (TCP, UDP, voz, etc.), soporta tanto tráfico IPv4 como IPv6 y es capaz de generar tráfico en las capas de red, transporte y aplicación. Además, permite caracterizar estadísticamente el tráfico inyectado, definir varios flujos simultáneos, marcar prioridades específicas para cada uno de ellos, mediante los campos TOS (DSCP) y TTL (*Time-to-Live*), y también simular comunicaciones bidireccionales.

Con este software es posible hacer experimentos reales empleando cualquier tipo de plataforma para obtener medidas de desempeño en diferentes escenarios, como por ejemplo mediciones de paquetes perdidos, retardo, *jitter*, caudal, que pueden ser visualizadas de manera sencilla mediante gráficos, los cuales caracterizan la QoS en una red.

Las características descritas anteriormente hacen que el D-ITG sea una herramienta ideal para utilizarla en este proyecto, para lo cual se emplearan las herramientas de línea de comandos que dicho software proporciona y se elaboraran *scripts* para simular los diferentes tipos de tráfico con sus características específicas los cuales serán marcados mediante la misma herramienta con el código DSCP correspondiente.

#### ■ Matlab

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Este software se puede utilizar en proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo.

El procesamiento de las medidas y la obtención de las gráficas presentadas en el Apartado 6.3 ("Presentación de Resultados") se realizó mediante este software.

- **Otras herramientas software**

Finalmente, cabe mencionar que durante el desarrollo de este proyecto también se utilizaron diversas herramientas del entorno Linux, por ejemplo `ifconfig` para configurar las interfaces en los equipos, etc., éstas se irán describiendo en los siguientes capítulos conforme se vayan utilizando.





# **Parte III**

## **RESULTADOS**



# Capítulo 5

## Descripción de la Propuesta de Integración

La propuesta presentada en este PFM afronta la provisión de QoS en redes inalámbricas híbridas formadas por dos segmentos principales de red, uno basado en IEEE-802.16 (WiMAX) y el otro en IEEE-802.11e-EDCA (WiFi-EDCA), con topología punto-multipunto, describiendo una estrategia que se apoya en las herramientas proporcionadas por 802.11e y el modelo de servicios diferenciados de IP, para preservar la QoS extremo a extremo.

Las tecnologías WiMAX y WiFi-EDCA proporcionan un soporte de QoS de muy distinta naturaleza; como se ha podido observar en el Capítulo 2. El objetivo de esta estrategia es proponer reglas óptimas de integración de redes híbridas IP sobre WiFi + WiMAX, de tal forma que se preserve en lo posible la QoS ofrecida a las aplicaciones, pero haciendo posible una extensión de la cobertura en zonas rurales a un costo más razonable que el de una infraestructura WiMAX pura.

En este Capítulo se describe con detalle la estrategia de integración propuesta, para lo cual en el Apartado 5.1 se describirá de forma general el funcionamiento de dicha propuesta, después en el Apartado 5.2 se detallarán los convenios de mapeado de tráfico considerados entre las tecnologías involucradas y en el resto de los Apartados se describirán las características de diseño de cada uno de los bloques que conforman a la arquitectura propuesta.

### 5.1. Estrategia de integración para IEEE 802.11e modo EDCA e IEEE 802.16 con soporte para QoS

La propuesta de integración que se describirá en este apartado considera una topología punto multipunto entre la red de acceso WiMAX y la arquitectura híbrida; además, y como se mencionó en el Apartado 2, se trabajará con equipos WiFi que tienen implementado el estándar 802.11e-EDCA y con equipos WiMAX en modo punto-multipunto, ya que son las tecnologías que implementa la mayoría del hardware que existe en el mercado, estableciendo un bajo nivel de complejidad en la integración y una total independencia de la capa física con la que se trabaja, lo que hará que la arquitectura tenga mayor flexibilidad.

Dicha propuesta se complementa con el modelo de servicios diferenciados (DiffServ) en la capa IP, pues como ya se mencionó en la Sección 2.4 esta tecnología posee mayor flexibilidad

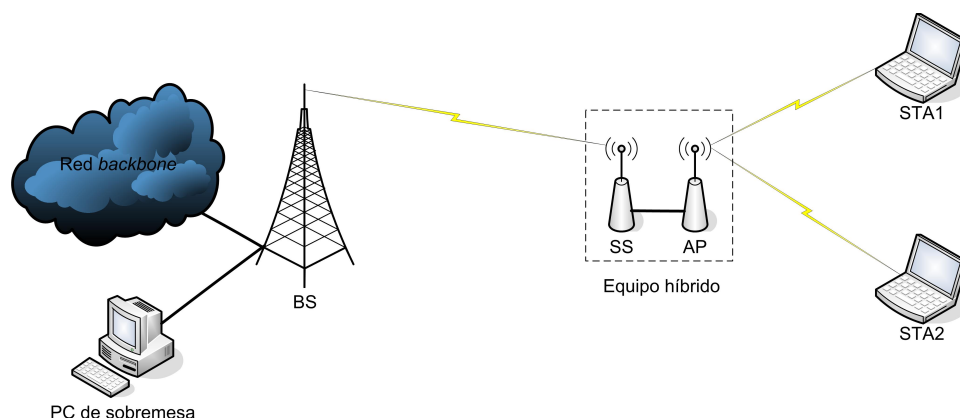


Figura 5.1: Arquitectura de red

y escalabilidad frente al modelo IntServ, a la hora de plantear QoS a nivel IP y el tratamiento diferenciado no sólo debe limitarse a la capa MAC, sino que debe ser aplicado también a capas superiores.

La arquitectura de red propuesta para la integración se muestra en la Figura 5.1 y esta compuesta por una red WiMAX, formada por una un equipo de usuario o Estación Suscriptor (SS) y una Estación Base (BS) ideada para la conexión con una red *backbone*, como Internet. Cada SS forma parte de un equipo híbrido que físicamente está integrado por dos bloques, el primero de ellos compuesto por la misma SS a la que se le llama bloque WiMAX, el cual está conectado mediante un cable Ethernet al segundo bloque, denominado bloque WiFi que a su vez se compone de un punto de acceso (AP) IEEE 802.11 (WiFi) con soporte de Calidad de Servicio diferenciada (modo EDCA), las características de ambos equipos se describieron en el Apartado 4.2 y están disponibles comercialmente. El AP se encarga de reenviar el tráfico hacia la red de acceso 802.11e a través de la cual las aplicaciones de los clientes se conectan a Internet, de tal forma que la QoS de todas las aplicaciones sea garantizada de un extremo a otro de la red.

La estrategia de integración propuesta realiza una serie de funciones que proporcionan soporte de QoS, basado en la priorización de clases de tráfico en una red heterogénea; apoyándose en las herramientas proporcionadas por los estándares IEEE 802.16, IEEE 802.11e y el modelo de servicios diferenciados DiffServ, se ajustan los parámetros que permite cada una de las tecnologías involucradas con respecto a los requerimientos establecidos por cada tipo de tráfico de acuerdo al escenario configurado.

Primero se configuran los requerimientos de cada tipo de flujo en la BS, la cual se encarga de transmitirlos a la SS correspondiente y con base en dicha información; se ajustan los parámetros de interés en el bloque WiFi, tanto los que corresponden al modelo DiffServ a nivel IP como los correspondientes a los parámetros de contienda del esquema 802.11e EDCA. La estrategia de integración incluye una propuesta de mapeado entre las diferentes clases de tráfico de IEEE 802.16, IEEE 802.11e-EDCA y el modelo de servicios diferenciados en capa IP, la descripción y características de cada uno de estos módulos se detallan en los siguientes Apartados. Cabe mencionar, que ninguna de las implementaciones de los estándares presentará ningún cambio en sí mismo, únicamente se reconfigurarán los parámetros necesarios en el Bloque WiFi, tanto

a nivel capa MAC como en la capa IP, con la finalidad de homogeneizar el tratamiento que se les da a los diferentes tipos de tráfico, para conservar los requerimientos de QoS de cada flujo que circule por la red heterogénea.

En la Figura 5.2, se presenta el diagrama de bloques de la arquitectura de integración propuesta para 802.16/802.11e descrito en esta Sección.

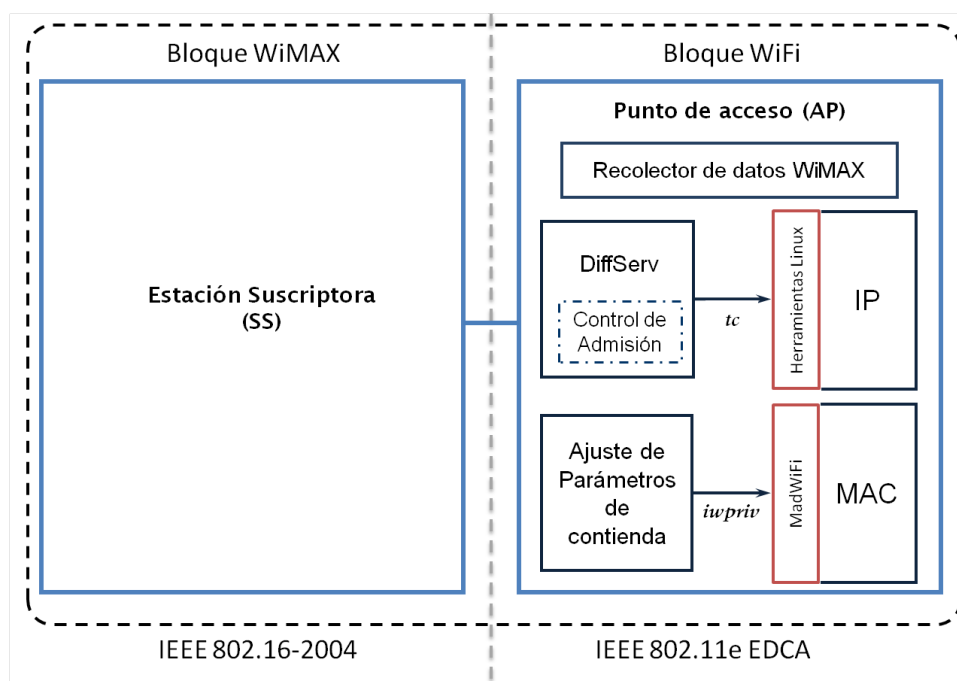


Figura 5.2: Diagrama de bloques de la Propuesta de Integración

La arquitectura de integración se ha desarrollado usando diversas herramientas de código abierto en entorno Linux, como `iproute2` que contiene el sistema Traffic Control (`tc`), el cual soporta diversos métodos de clasificación, priorizado, compartición y limitación de tráfico en capa IP y al chipset de Atheros y su driver `MadWiFi` creado para Linux, mediante el cual podemos modificar fácilmente los parámetros de contienda de la capa MAC del bloque WiFi, utilizando la herramienta `iwpriv`.

## 5.2. Tipos de tráfico y mapeado

Para lograr una adecuada clasificación del tráfico que circula por la red, un aspecto fundamental a la hora de integrar varias tecnologías es el mapeado entre los distintos mecanismos utilizados en los protocolos de diferentes capas. Este mapeado debe establecer un convenio de correspondencia entre dichos mecanismos, de tal forma que paquetes pertenecientes a un determinado flujo de datos sean clasificados a un mismo tipo de tráfico a lo largo de todo el camino.

Las dos tecnologías involucradas en este proyecto intercambian información entendiéndose a nivel IP, dado que su nivel físico y el de acceso al medio está definido mediante distintos estándares, IEEE 802.16-2004 y IEEE 802.11e modo EDCA. Por esta razón, el mecanismo de

clasificación que comparten ambos bloques de la arquitectura propuesta es el punto de código de servicios diferenciados (DSCP). Los códigos DSCP permiten la asignación de distintos niveles de servicio al tráfico de red. Para ello, cada paquete de la red debe ser marcado con un código DSCP para que pueda ser asociado el nivel de servicio correspondiente. Los códigos DSCP hacen posible marcar un número elevado de diferentes tipos de tráfico, variando además su prioridad de descarte.

En la primera fase del proyecto Open Reach [38], se desarrolló la propuesta de mapeado mostrada en la Tabla 5.3, en ella se establece el mapeado entre clases de tráfico a nivel IP, WiFi con QoS (IEEE 802.11e modo EDCA) y WiMAX (IEEE 802.16-2004), así como una definición del tipo de servicio de cada clase de tráfico en la red híbrida y posibles ejemplos de aplicaciones que encajarían con cada una de las clases. Para establecer el mapeado entre las distintas tecnologías se han seguido las propuestas más interesantes presentadas en los trabajos previos recopilados en la Sección 2.5. Como se puede observar, en este proyecto se consideran cuatro tipos de tráfico: VoIP, Vídeo, Señalización y Datos, debido a que estos son los tipos de tráfico que se mapean a las cuatro categorías de acceso definidas en el modo EDCA del estándar IEEE 802.11e.

Sin embargo, aunque la propuesta de mapeado anteriormente expuesta es totalmente válida, la implementación del *driver* MadWifi [39] en su versión 0.9.4+r4099 que se emplea en el bloque WiFi utiliza un convenio distinto para realizar el mapeo de los códigos DSCP a las categorías de acceso EDCA, por lo cual bien se debe modificar dicho *driver* de acuerdo al mapeado propuesto en la Figura 5.3, o bien se debe adecuar tanto la propuesta de integración como el diseño de las pruebas de la misma a la implementación de MadWifi que se utilice. La Tabla 5.2 muestra la correspondencia que utiliza el *driver* MadWifi para realizar la clasificación de los paquetes de clases DSCP a categorías EDCA. Este mapeo está descrito en el fichero `ieee80211_output.c` de dicho *driver*.

Campo DS	Valores DSCP	Clases DSCP	Categoría de acceso EDCA
0b00000000 / 0x00	000000 / 0x00	<i>Default</i>	AC_BE
0b00001000 / 0x08	000010 / 0x02	CS1	AC_BK
0b00100000 / 0x20	001000 / 0x08	CS1	
0b00101000 / 0x28	001010 / 0x0a	AF11	AC_VI
0b10100000 / 0xa0	101000 / 0x28	CS5	
0b11000000 / 0x30	110000 / 0x30	AF11	AC_VO
0b10001000 / 0x88	100010 / 0x22	AF41	
0b10111000 / 0xb8	101110 / 0x2e	EF	
0b11100000 / 0xe0	111000 / 0x38	CS7	

Tabla 5.1: Mapeado de códigos TOS a categorías de acceso EDCA realizado por el *driver* MadWifi versión 0.9.4.

Además del convenio de mapeado es importante saber que requerimientos tiene cada tipo de tráfico en particular; para ello en la Tabla 5.2 se resumen las recomendaciones de la (*Internatio-*

<i>DSCP class</i>	<i>AC Wi-Fi</i>	<i>TC Wi-Fi</i>	<i>Wi-Fi Parameters</i>	<i>WiMAX Class</i>	<i>WiMAX Parameters</i>	<i>Examples</i>
(000)000 BE	AC_BE	TC0, TC3	Peak Data Rate, User Priority	BE	Maximum Sustained Traffic Rate, Traffic Priority	Internet traffic, HTTP
(010)xxx AF2x	AC_BK	TC1, TC2	Minimum Data Rate, Peak Data Rate, User Priority, Burst Size	rtPS	Minimum Reserves Traffic Rate, Maximum Sustained Traffic Rate, Traffic Priority, Maximum Traffic Burst	FTP
(100)xxx AF4x	AC_VI	TC4, TC5	Minimum Data Rate, Peak Data Rate, Delay Bound, Burst Size	rtPS	Minimum Reserves Traffic Rate, Maximum Sustained Traffic Rate, Maximum Latency, Maximum Traffic Burst	MPEG, VoIP with Silent suppression (VBR Traffic)
(101)xxx EF	AC_VO	TC6, TC7	Peak Data Rate, Delay Bound, (Calculated Jitter)	UGS	Maximum Sustained Traffic Rate, Maximum latency, Tolerated Jitter	VoIP without Silent suppression (CBR Traffic)

Figura 5.3: Propuesta de mapeado de tráfico para WiFi y WiMAX

nal Telecommunication Union) [40] para los parámetros de QoS mencionados en el Apartado 2.1.

### 5.3. Bloque WiMAX

En esta Sección se describe la funcionalidad del bloque 802.16-2009 o bloque WiMAX, anteriormente representado en la Figura 5.2 que ilustra la estructura de la propuesta de integración elaborada en este proyecto. Este bloque está compuesto por una Estación Suscriptora (SS) con las características mencionadas en la Sección 4.2 y es un equipo comercial al que no se le pueden realizar cambios, salvo los que posibilita la interfaz de configuración; además, tomando como base que este estándar proporciona calidad de servicio parametrizada que permite garantizar los requerimientos de cada flujo en función de la configuración definida, como se mencionó

Clases ITU	Características de las aplicaciones	Ejemplos de las aplicaciones	Requerimientos	Requerimientos cuantitativos
0	Tiempo real, sensibles a jitter, altamente interactivas, tasa de bit variable y constante	VoIP, tele o videoconferencia, multimedia	Retardo y jitter limitados, bajas pérdidas y errores	<i>Retardo=100ms, Jitter=50ms</i>
1	Tiempo real, sensibles a jitter, interactivas, tasa de bit variable y constante			<i>Retardo=400ms, Jitter=50ms</i>
2	Datos transaccionales, señalización, altamente interactivas	Señalización, transaccional	Retardo limitado	<i>Retardo=100ms</i>
3	Datos transaccionales, interactivas	Transaccional	Retardo limitado	<i>Retardo=400ms</i>
4	Sensibles a pérdidas, transacciones cortas, datos en grandes cantidades (bulk), flujo continuo, tasa de bit variable	Audio/vídeo streaming	<i>Jitter</i> limitado, bajas pérdidas y errores	<i>Retardo=1s</i>
5	Aplicaciones tradicionales de redes IP	Navegación Web, tráfico Internet	Retardo limitado, bajas tasas de error	No hay requerimientos estrictos
		Transferencia de e-mail y ficheros (FTP)	Bajas tasas de error	

Tabla 5.2: Recomendaciones ITU para los parámetros de QoS [2]

en el Apartado 2.3, no será necesario realizar cambios en su funcionamiento y/o estructura. Por estos motivos, el funcionamiento de este bloque se limita a el correcto aprovisionamiento de los flujos de servicio necesarios en función de los requerimientos de cada tipo de tráfico.

### 5.3.1. Aprovisionamiento de flujos de servicio

Como se ha mencionado en la Sección 2.3, WiMAX define mecanismos de aprovisionamiento que permiten tener un control absoluto sobre las transmisiones y garantizar QoS de forma parametrizada.

Para ello, los usuarios y sus respectivos servicios contratados deben ser previamente definidos de acuerdo con el sistema de aprovisionamiento de los equipos WiMAX, de tal forma que dicho sistema decidirá si permitir el acceso a la red a un usuario concreto, sobre los servicios que puede utilizar y qué recursos asignar a este usuario. La estación base es la encargada de realizar el aprovisionamiento, para lo cual contiene una base de datos donde se aloja la información sobre los usuarios y sus servicios. La estación base ARBA-550 utilizada en el desarrollo de este proyecto permite consultar y modificar estos datos mediante una interfaz web, que se



emplea para la configuración y control de muchos aspectos de su funcionamiento.

Para el aprovisionamiento de servicios en un enlace WiMAX (BS-SS) es necesaria la configuración de flujos de servicio en ambos sentidos (*uplink* y *downlink*). En particular, se deben crear dos flujos de servicio (uno por cada sentido) para cada comunicación bidireccional que se desee habilitar; por ejemplo, para las pruebas que se realizarán en este PFM, se han configurado cuatro flujos en cada sentido que corresponden a cada tipo de tráfico de los que se han propuesto en la Sección anterior.

Además, para asegurar que el tráfico que atraviesa el enlace WiMAX sea clasificado correctamente y, por lo tanto, para que se le pueda garantizar QoS, es necesario configurar para cada uno de los flujos un criterio de clasificación o filtro. Mediante la interfaz Web de la BS se pueden definir para cada flujo distintos filtros, con base en diferentes criterios de selección, por ejemplo: mediante el campo TOS/DSCP de la cabecera IP, por dirección IP origen o destino, dirección Ethernet origen o destino, intervalo de puertos, etc. Para el caso concreto de este proyecto se debe configurar un filtro a cada flujo mediante su campo DSCP según lo dispuesto en la Sección 5.2.

En cuanto a las garantías de QoS, éstas se deben especificar dentro de la misma interfaz Web para cada flujo, los parámetros de QoS que se pueden configurar, de acuerdo a las especificaciones del fabricante [41] son:

- **QoS Type:** El valor de este parámetro especifica el tipo de servicio asociado a cada flujo. En este caso este parámetro soporta cinco tipos de servicio: UGS (*Unsolicited Grant Service*), ErtPS (*Extended Real-time Polling Service*), rtPS (*Real-time Polling Service*), nrtPS (*Non-real-time Polling Service*) y BE (*Best Effort*), definidos previamente en la Sección 2.3.
- **QoS Priority:** También llamada “*Traffic Priority*” en el estándar, especifica la prioridad asignada a cada flujo de servicio, dentro de la interfaz Web ésta puede tomar valores de 0 a 7, y cuanto mayor sea el número mayor es su prioridad.
- **Maximum Rate:** Este parámetro relacionado con el “*Maximum Sustained Traffic Rate*” definido en el estándar [10] define la máxima velocidad de transmisión de un determinado flujo de servicio, este parámetro establece un límite máximo, pero no garantiza que esa tasa este disponible.
- **Minimum Rate:** Este parámetro relacionado con el “*Minimum Reserved Traffic Rate*” definido en el estándar, [10] especifica la tasa mínima reservada para cada flujo de servicio. A diferencia del caso anterior, esta velocidad mínima sí está garantizada para cada flujo en el planificador de la BS. Si vale 0 no se garantiza ninguna tasa para el flujo en cuestión.
- **Maximum Burst:** Definido en el estándar como “*Maximum Traffic Burst*”, es la unidad de tráfico máxima (*maximum burst size*) que llega a la capa MAC con una velocidad máxima; si vale cero significa que no hay un requerimiento establecido para este parámetro.
- **Maximum Jitter:** Definida en el estándar con el mismo nombre “*Tolerated Jitter*”, define la variación máxima de retardo para cada conexión.

- **Maximum Latency:** Llamada de igual forma en el estándar, especifica el retardo máximo entre la recepción de un paquete por la BS o la SS en su interfaz de red y el reenvío del paquete a su interfaz de RF.
- **Grant Interval:** Cada cierto tiempo, definido en este parámetro la BS dará a la SS el ancho de banda requerido.
- **Polling Interval:** Define el intervalo máximo de tiempo que la BS debe esperar para realizar el siguiente requerimiento de *Polling*, preguntando a los usuarios por sus requerimientos de ancho de banda.

Todos estos parámetros definen la calidad de servicio que tendrá cada flujo provisionado. En el caso concreto de este proyecto los valores de el tipo de servicio, la prioridad QoS, la tasa máxima y mínima, el retardo o latencia máxima y variación de retardo o *jitter* máximo, se fijarán en función de cada clase de tráfico y el resto de los parámetros tendrán un valor de cero, con lo cual estamos diciendo a la BS que no se requiere que garantice ningún valor para estos parámetros concretos. Para determinar que valor se debe asignar a cada tipo de tráfico se tomarán como base los valores de las recomendaciones de ITU, previamente resumidas en la Tabla 5.2.

## 5.4. Bloque WiFi

Continuando con la descripción de los bloques que conforman a la propuesta de integración representados en la Figura 5.2, en este Apartado se describirán las funcionalidades del bloque 802.11e, o bloque WiFi. Las funciones que realiza este bloque se dividen en dos partes principales: los ajustes que realizan en la capa IP basados en el mecanismo DiffServ y los ajustes a los parámetros de contienda de la capa MAC de los equipos WiFi.

Cabe mencionar que, dentro del proyecto donde se enmarca este PFM, se estaba trabajando en una propuesta para desarrollar un módulo de recopilación de información mediante XML-RPC<sup>1</sup>. Este módulo se encarga de obtener de forma dinámica los valores de configuración de los flujos de servicio en los que participa la estación subscriptora WiMAX, provisionados en la BS y realizar dinámicamente los ajustes necesarios en el bloque WiFi como el ajuste colas de capa IP o los parámetros contienda de capa MAC de la red WiFi, sin embargo, dicho módulo no está dentro de los alcances de este PFM.

La configuración del mecanismo DiffServ de la capa IP y los ajustes de los parámetros de contienda de la capa MAC de WiFi se describen en los siguientes Apartados.

### 5.4.1. Capa IP: DiffServ

El modelo de servicios diferenciados propone una solución para el soporte de calidad de servicio basado en la priorización de clases de tráfico, de forma que la QoS que se puede obtener se fundamenta en un estudio estadístico del tráfico presente en la red. La clasificación de los

---

<sup>1</sup>El protocolo XML-RPC (*eXtensible Markup Language - Remote Procedure Call*), es el que utiliza Alentia Systems en sus equipos como parte del sistema de Gestión de Configuración.

diferentes tipos de tráfico se realiza principalmente mediante el filtrado de paquetes por el código DSCP de sus cabeceras IP, tal y como se ha descrito anteriormente en la Sección "Tipos de tráfico y mapeado". Después de esta clasificación, los paquetes son tratados de distinta manera en función de la clase a la que pertenecen y de la prioridad que tienen asignada.

Es por eso que el funcionamiento de este modelo se ajusta adecuadamente a la variabilidad de las condiciones de acceso en una red inalámbrica, lo cual se traduce en una velocidad de acceso en constante cambio, así como una elevada probabilidad de error en la recepción de tramas. Por tales motivos, DiffServ es el modelo que se ha elegido para la provisión de QoS en la capa IP. En las siguientes dos Secciones se describen los detalles de su implementación en el escenario de este proyecto mediante la herramienta `tc`, así como la forma en la que dicha herramienta se ha utilizado para establecer un control de admisión de las distintas clases de tráfico.

#### 5.4.1.1. Implementación de DiffServ mediante `tc`

Para la implementación de los Servicios Diferenciados en Linux, se emplea la herramienta de Control de Tráfico (*Traffic Control*) que se configura mediante la utilidad `tc` [42]. Dicha utilidad es parte del paquete `iproute2` [43] y permite construir combinaciones, incluso complejas, de disciplinas de colas, clases y filtros que controlen el proceso del envío de los paquetes a través de la interfaz de salida de la tarjeta de red.

Los detalles de implementación de la arquitectura DiffServ de este proyecto, según los criterios de diseño más importantes de control de tráfico mediante `tc` en Linux, se enlistan a continuación:

- **Disciplina de colas**

Para el control de tráfico en Linux, la herramienta `tc` provee diversas disciplinas de colas que pueden ser utilizadas dependiendo de como se desee gestionar el tráfico. Para el caso concreto de este PFM, nos interesan las disciplinas de colas con clases, las cuales son muy útiles si se tienen diferentes tipos de tráfico a los que se quiere dar un tratamiento diferenciado.

A lo largo de los años, la disciplina de colas más frecuentemente utilizada para la implementación de DiffServ en Linux ha sido CBQ (*Class Based Queueing*). Sin embargo, se ha demostrado [44] que CBQ es demasiado compleja y no está optimizada para la mayoría de los escenarios más frecuentes. Su estructura jerárquica se ajusta bien a configuraciones donde se dispone de una cantidad fija de ancho de banda a dividir entre diferentes propósitos, como el caso de una red cableada, por lo que el enfoque de una CBQ no es el adecuado para el escenario de este proyecto. Existen otras disciplinas de colas que se ajustan mejor a las condiciones de las redes inalámbricas, por ejemplo la disciplina HTB (*Hierarchical Token Bucket*) que realiza las mismas funciones que CBQ, pero sin recurrir a cálculos de tiempo ocioso para los ajustes, resulta más eficiente en nuestro caso, por lo cual es la elegida para realizar la implementación.

HTB es una disciplina de colas con clase que permite dividir el ancho de banda disponible entre un mínimo y un máximo. El algoritmo asegura la disponibilidad del mínimo, y si se

permite, alcanzar el máximo. Además puede “pedir prestado” el ancho de banda sobrante que no se use. Esta disciplina de colas nos ayudará a controlar el uso del ancho de banda de salida en los equipos para cada tipo de tráfico.

Además de HTB, para controlar el envío de paquetes pertenecientes a la misma clase, se ha utilizado la disciplina SFQ (*Stochastic Fairness Queueing*), la cual permite mantener un número grande de colas FIFO (*First In, First Out*) para cada uno de los micro-flujos, es decir, flujos particulares entre un emisor y un receptor dados. De esta forma se realiza una planificación justa y sin privar de recursos a ningún micro-flujo frente a otro.

#### ■ Clases

Considerando que cada uno de los cuatro pares de flujos se tienen diferentes requerimientos de QoS, se crearán cuatro clases principales para cada uno de ellos dentro de la disciplina de colas HTB, de tal forma que se cumplan en la medida de lo posible con los requerimientos establecidos por cada tipo de tráfico. El servicio de voz requiere bajo retardo, pocas pérdidas y en ningún momento debe verse afectado por la presencia de otros tipos de tráfico. El vídeo está por encima del tráfico de datos, pero no puede ser procesado antes que el de voz, tiene unos requerimientos estrictos de pérdidas, retardo *yjitter*. El tráfico de datos corresponde a las aplicaciones tradicionales de redes IP, tales como navegación en páginas *web*, transferencia de correo electrónico, etc., es el de menor prioridad de los anteriormente descritos y sólo debe ser cursado si existen recursos disponibles y no utilizados por dichos servicios de mayor prioridad.

Además, tomando en cuenta que para cada clase creada con  $t_c$  se le adjunta una cola FIFO, esta será reemplazada por una cola SFQ como se mencionó anteriormente, ya que es más adecuada para el tratamiento que se le quiere dar a los flujos que circulan por la red.

#### ■ Configuración de las disciplinas

A partir de lo mencionado anteriormente, es importante detallar el comportamiento deseado para cada una de **las cuatro clases principales** de tráfico, y la configuración que estas requieren para conseguir dicho comportamiento, lo cual se describe a continuación:

##### VoIP

- *El servicio de voz recibe un tratamiento de mayor prioridad y bajo retardo:* El parámetro `prio` de la disciplina `htb`, permite que paquetes pertenecientes a clases con mayor prioridad tomen prestado el ancho de banda excedente (configurado mediante el parámetro `ceil`) en primer lugar y también sean enviados antes, lo cual minimiza su retardo.
- *Su caudal mínimo total asegurado se configura de tal forma que permite cursar un número máximo permitido de conversaciones:* En primer lugar se establece el número máximo permitido de conversaciones  $N$ . En segundo lugar se fija la tasa media  $R$  de una conversación, la cual depende del *codec* utilizado. Por último, el caudal mínimo asegurado obtenido como  $N * R$  es modelado mediante el parámetro `rate`.

- *El caudal individual máximo permitido de estas conversaciones también es fijado a un valor concreto:* Como se acaba de mencionar en el párrafo anterior, este valor depende del *codec* de audio utilizado, lo cual puede ser configurado bien mediante el programa cliente de voz, o bien mediante el generador de tráfico utilizado.
- *El control de admisión asegura no sobrepasar el número máximo permitido de conversaciones simultáneas:* Dicho control de admisión es realizado para cada clase mediante la cola *ingress* aplicada en la entrada de la interfaz correspondiente y filtros de *policing* [42] como se describirá en el siguiente Apartado de “Control de admisión”.

### Vídeo

- *El servicio de vídeo recibe un tratamiento de alta prioridad, pero por debajo de la asignada al servicio de voz:* Nuevamente, esto se consigue mediante el parámetro *prio*.
- *Goza de un caudal mínimo total asegurado, de tal forma que simultáneamente se permite dar servicio a un número máximo fijo de suscriptores de 'streaming' de vídeo. El caudal máximo permitido de un flujo de vídeo es fijado a un valor concreto:* Este comportamiento se consigue de forma análoga que en el caso del tráfico de voz.
- *El control de admisión asegura no sobrepasar el número máximo permitido de suscriptores simultáneos:* Al igual que en el caso de voz, se limitará el caudal del tráfico de vídeo mediante los filtros de *policing*.

### Señalización y datos

- *Los servicios de señalización y datos obtienen el ancho de banda restante después de repartir los recursos entre los servicios de mayor prioridad: voz y vídeo:* Atribuyendo valores mayores de *prio* (es decir, menor prioridad) a los servicios de señalización y datos (teniendo en cuenta que señalización es un servicio más prioritario que datos), se consigue que sufran mayor retardo que las clases de mayor prioridad y tengan menores posibilidades de tomar prestado el ancho de banda excedente.

Además de las cuatro clases descritas anteriormente, es conveniente la creación de una clase adicional que limite el caudal del **tráfico interno** que se pueda generar en la red, este tráfico es aquel con origen y destino dentro de la misma red WiFi. El tratamiento que se le dará a esta clase será independiente de la QoS que se requiera en cada caso particular, es decir, que dicho tráfico siempre será tratado como de la clase *best effort*. Para evitar, que flujos internos saturen la interfaz inalámbrica del bloque WiFi y perjudiquen a la calidad de servicio extremo a extremo de la red híbrida, que es el objetivo principal de este proyecto, se le asignará al tráfico interno un caudal que no supere en ningún caso el 12 % del caudal máximo del enlace. Este tipo de tratamiento se consigue de la misma forma en que ha sido explicado anteriormente. En la Figura 5.4 se puede observar un ejemplos de flujos de tráfico interno.

Finalmente, en la Figura 5.5 se puede observar el árbol completo de clases de disciplinas de colas que se obtiene al combinar todo lo expuesto en este Apartado de “Configuración de disciplinas”.

#### ■ Filtros

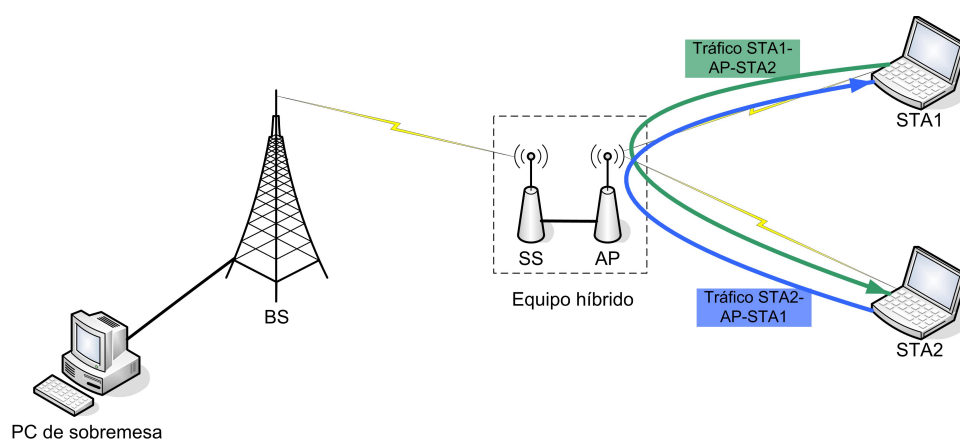


Figura 5.4: Representación esquemática de flujos de tráfico interno del bloque WiFi.

Además de la creación de clases, para poder clasificar de manera correcta el tráfico de determinada categoría, es decir, lograr diferenciar entre paquetes de distintas clases se ha configurado un filtro a cada una de las clases, esto se realiza mediante el filtro `u32`, que basa su decisión en la información contenida en las cabeceras IP de los paquetes, en particular, el valor DSCP.

#### ■ Interfaz de aplicación

Las disciplinas anteriormente descritas son aplicables a la salida de las interfaces de red. Por lo tanto, la interfaz donde éstas deben ser adjuntadas varía en función del enlace que se esté considerando. La Figura 5.6 representa el esquema de la disposición de las interfaces de red y el sentido de los enlaces de comunicación posibles. Así, en el escenario dado, para controlar el envío de los paquetes que viajen en *downlink* se debe aplicar una serie de colas a la interfaz `ath0` del bloque WiFi. En cambio, en el caso de *uplink* las colas se tienen que instalar en la interfaz `eth0` de dicho bloque y en las interfaces `ath0` de cada una de las estaciones (STA-EDCA).

De esta forma, en sentido *downlink* quien ofrecerá diferenciación de servicios será el bloque WiFi a las STA's asociadas a él, mientras que en el sentido *uplink* serán las estaciones las que implementen los servicios diferenciados para que el tráfico generado por cada estación tenga un tratamiento diferenciado desde la interfaz de salida de cada cliente; en el AP esto no será necesario ya que será suficiente el tratamiento QoS que reciban los paquetes en su paso por el bloque WiMAX. Sin embargo, como se verá en el siguiente Apartado, para el propósito de control de admisión las colas necesarias se aplican en la interfaz de la entrada (cola *ingres*), es decir, en la interfaz `eth0` en caso *downlink* y `ath0` en caso *uplink*.

#### 5.4.1.2. Control de admisión

El control de admisión mencionado en el Apartado anterior es un procedimiento fundamental para la provisión de la QoS que ofrece la posibilidad de designar cómo, cuándo y quién utiliza los recursos de la red, es decir, controla la cantidad de ancho de banda que se puede utilizar en un momento dado por un flujo concreto, determinado por direcciones origen/destino y aplicación

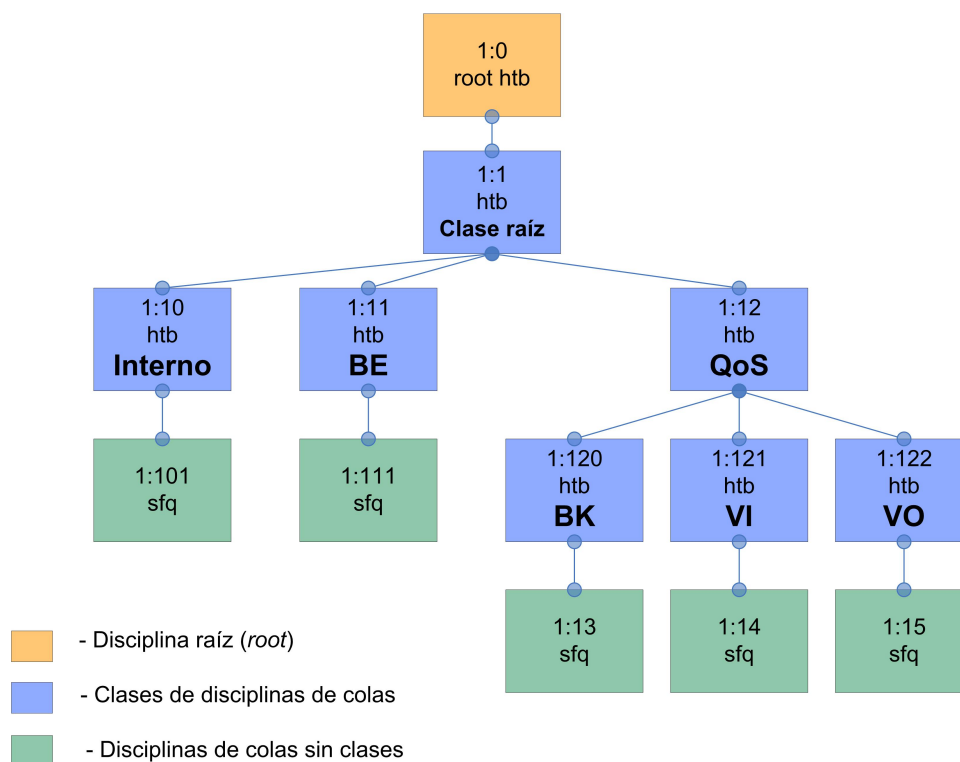


Figura 5.5: Árbol de disciplinas de colas `tc` para la implementación de DiffServ de este proyecto.

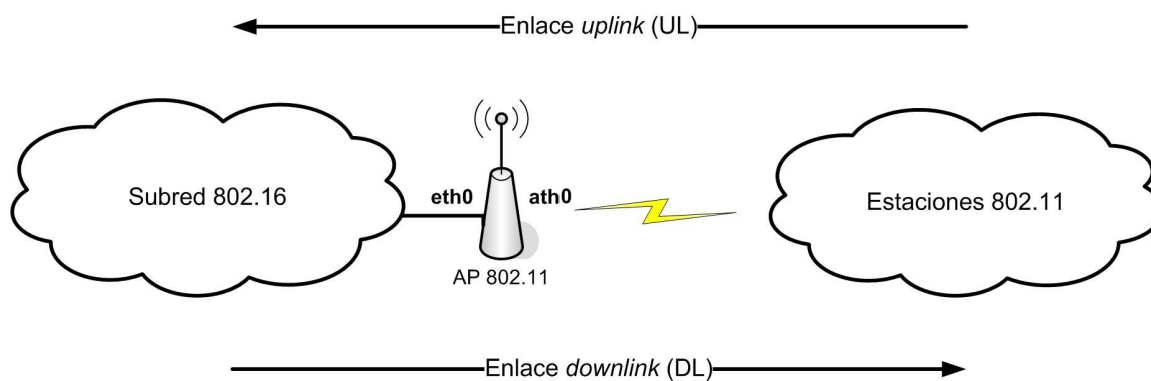


Figura 5.6: Disposición de las interfaces de red del Punto de Acceso y el sentido de los enlaces de comunicación.

que lo genera, o tipo de tráfico al que pertenece. El mecanismo que implementa el control de admisión en este proyecto son: los filtros de *policing* aplicados a la cola *ingres* que permiten limitar la cantidad de tráfico que puede pasar a través de ellos en cada momento (parámetro `rate`) y con qué criterio (parámetro `match`) y prioridad (parámetro `prio`). Se distinguen dos casos:

- **Downlink:** El control de admisión es realizado por el bloque WiMAX en función de las características de los flujos *downlink* que tenga configurados. Además, se asume que un flujo admitido en el lado WiMAX debe ser admitido en el lado WiFi, por lo cual no es

necesario instalar una cola `ingress` en la interfaz `eth0` del bloque WiFi con el fin de efectuar un control de admisión. Pero con el propósito de enviar con máxima prioridad el tráfico de Voz a la cola de salida correspondiente, para disminuir el retardo que podría introducir el mismo *router* a dicho tráfico se configurará una cola `ingres` en dicha interfaz.

- **Uplink:** El tráfico es generado en el extremo WiFi, es decir, en las estaciones 802.11. Además, se debe tener en cuenta que en su paso por el bloque WiMAX este tráfico sufrirá el control de admisión definido en el estándar IEEE 802.16-2009 (WiMAX), por lo cual, para asegurar una QoS extremo a extremo será necesario realizar un control de admisión también en el extremo WiFi, dado que si el enlace WiFi permitiera mayores recursos que el enlace WiMAX, el control de admisión de la BS denegaría acceso o descartaría parte de flujos, previamente admitidos por el bloque WiFi, lo cual no cumpliría el requerimiento de QoS extremo a extremo. De este modo, con el motivo de realizar un control de admisión de flujos *uplink* se debe instalar una cola `tc ingress` en la interfaz inalámbrica `ath0` del bloque WiFi.

En la Sección 5.4.1.1 se ha visto que el dimensionamiento de la capacidad de cada cola, que es lo mismo que el establecimiento de criterios de control de admisión, se hace en función del número máximo permitido de flujos  $N$  y de la tasa media  $R$  de un flujo del tipo de tráfico dado. Para que este dimensionamiento se haga acorde con el procedimiento de control de admisión en el bloque WiMAX, es necesario realizarlo en función de los flujos de servicio que éste tenga aprovisionados. Lo cual se podría efectuar mediante una configuración automática de disciplinas de colas `tc` (por ejemplo mediante el editor de flujos `awk` de Linux) a partir de la información de aprovisionamiento de flujos de servicio WiMAX recopilada mediante un cliente XML-RPC contenido en el bloque WiFi, mencionado anteriormente, pero esta implementación esta fuera de los alcances de este PFM. En el Apéndice A se presenta un *script* creado en lenguaje `bash` de Linux para la configuración de las disciplinas de colas en el bloque WiFi y en las estaciones.

## 5.4.2. Capa MAC: ajuste de parámetros de contienda

La transmisión de información en tiempo real como la voz, imponen estrictos requerimientos en cuanto a paquetes perdidos, retardo y *jitter*. La responsabilidad de reunir estos requerimientos debe ser compartida entre todas las capas involucradas en cada segmento de la red para lograr la correcta provisión de QoS. Continuando con la configuración del bloque WiFi, ahora se mencionarán los ajustes que se proponen realizar en la capa MAC, mediante la asignación de valores a los parámetros que permite modificar el estándar IEEE 802.11e-EDCA. Estos parámetros definidos a continuación, tienen establecido un valor por defecto para cada una de las categorías de acceso, que se incluye en el estándar [1], y se muestra en la Figura 2.2.1, del Capítulo 2 de este documento.

- **Número de Espacio Arbitrario entre Tramas** (*AIFSN Arbitrary Inter-Frame Space Number*): intervalo mínimo desde que el medio físico se detecta como vacío hasta que se comienza la transmisión.
- **Ventana de Contienda Mínima** ( $CW_{min}$  *Contention Window Minimum*): número de ranuras de tiempo calculado para el mecanismo de espera (*backoff*) de una estación antes de acceder al medio.



- **Ventana de Contienda Máxima** ( $CW_{max}$  *Contention Window Maximum*): Valor máximo que puede tomar la ventana de contienda antes de ser descartado un paquete.
- **Límite de Oportunidad de Transmisión** ( $TXOP_{limit}$  *Limit of Transmission Opportunity*): intervalo de tiempo limitado durante el cual una estación puede transmitir una serie de tramas.

Como es de esperar estos parámetros influyen directamente en la calidad de la información recibida, afectando al caudal máximo que se puede cursar, al retardo de los paquetes y al *jitter*, de distinta manera de acuerdo al valor que se les asigne.

Los dos mecanismos básicos para priorizar el acceso al canal que considera la especificación EDCA como se menciona en [45] son:  $CW_{min}$  y *AIFS*; ambos poseen mayor versatilidad para gestionar la priorización de flujos y son configurables dinámicamente en cada categoría de acceso desde un QAP. Por lo que serán estos los que se estudiarán y modificarán para proporcionar la QoS en la capa MAC, mientras que el  $CW_{max}$  se mantendrá fijo tomado los valores que se especifican en el estándar.

Adicionalmente, se propondrá el uso del parámetro *TXOP* para conseguir simetría en términos de caudal y retardo, entre el enlace *uplink* y *downlink* en la red heterogénea, y de esta forma soportar correctamente la QoS de los flujos con mayor prioridad.

Todas las modificaciones a la capa MAC de los equipos WiFi, se han realizado mediante la herramienta *iwpriv* que implementa el driver para Linux MadWiFi [39]. Estas modificaciones se controlan a través del Bloque WiFi y se transmite al resto de estaciones (*QSTA*) en las tramas *beacon* junto con otros parámetros relacionados con EDCA.

La configuración óptima de los parámetros de contienda en las redes WiFi ha sido ampliamente estudiado ([3],[46],[45]), y sus valores óptimos dependen en gran medida del número de estaciones activas, del tamaño de la red, la carga de tráfico y de la tasa de colisiones. Sin embargo, en el caso de la red híbrida del escenario de este proyecto, no existe una relación directa entre estos valores y los parámetros configurables en los flujos aprovisionados en la red WiMAX, debido a la forma tan distinta en que estos dos estándares proveen QoS, explicada detalladamente en el Capítulo 2.

Estas características, añadidas al comportamiento inestable de las redes inalámbricas, hacen muy complicado establecer una relación directa entre dichos parámetros, motivo por el cual este proyecto se centrará en explicar como influyen cada uno ellos en el comportamiento de los flujos en la red híbrida, lo cual se enlista continuación y en la etapa de pruebas de validación se analizarán distintos escenarios, de tal forma que se pueda establecer un valor adecuado para esa configuración en particular, que permita la provisión de QoS extremo a extremo.

- $CW_{min}$

El  $CW_{min}$  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 se desean

obtener las mejores prestaciones.

Según indica [47] el parámetro  $CW_{min}$  permite configurar una relación de flujos directamente proporcional a la relación de los parámetros  $CW_{min}$  configurados en las diferentes colas de acceso. Valores muy bajos de  $CW_{min}$ , por una parte propiciarían altas probabilidades de colisión, por lo que el rendimiento sería bajo. Por otra parte, valores elevados de  $CW_{min}$  evitarían las colisiones a costa de esperar un número excesivo de ranuras de tiempo; es por esto que existirá un valor óptimo de ventana de contienda en cada situación.

El valor óptimo del parámetro  $CW_{min}$  dependerá entonces del número de nodos activos en la red y debe minimizar el retardo y maximizar el caudal efectivo cursado por la red, teniendo cuidado de no aumentar demasiado este valor pues se podrían estar desaprovechando los recursos de la red.

#### ■ *AIFS*

El parámetro AIFSN, es un parámetro que influye en el mecanismo de *Backoff*, de forma que permite dar más o menos prioridad a un tráfico en términos de retardo y caudal, aumentando o disminuyendo su valor en una estación o AC, respecto al valor de otras estaciones o ACs [3]. Además, este parámetro 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 [47].

En el caso de tráfico de servicios diferenciados como el que se tendrá en el bloque WiFi, el parámetro *AIFS* puede ser empleado para lograr la priorización de tráfico entre las clases *DiffServ*. Para asignarle un valor óptimo, se debe tomar en cuenta que a medida que se aumenta el parámetro *AIFS* también se está aumentando el retardo que sufren los paquetes para acceder al canal, y en la misma medida reduciendo el caudal efectivo que se puede alcanzar, por lo que el valor de este parámetro al igual que  $CW_{min}$  también depende de la carga de la red.

Es de notar que el parámetro *AIFSN* provee una operación superior y más robusta que la diferenciación que otorga el parámetro  $CW_{min}$ , debido a la existencia de instantes discretos de tiempo, en los cuales un número discreto de estaciones pueden competir por el acceso al canal.

#### ■ $TXOP_{limit}$

El límite de Oportunidad de Transmisión ( $TXOP_{limit}$ ) es un periodo que se define a través de un tiempo de inicio y una duración máxima. Este parámetro no altera la probabilidad de colisión ni el mecanismo de *backoff* del medio y simplemente, en función de su valor, permite a la estación o AC de una estación, el envío de una o más tramas una vez que ha conseguido el acceso al medio [3].

Este parámetro se utilizará para conseguir simetría en términos de caudal y retardo, entre el enlace *uplink* y *downlink*, ya que como se ha observado en el modo punto-multipunto en el que trabaja el equipo híbrido, el bloque WiFi tiene que dividir su tráfico entre los  $n - 1$  nodos que dependen de él, por lo que normalmente se tiene  $n - 1$  veces más tráfico en el sentido de los nodos al bloque WiFi (*uplink*) que desde el bloque WiFi a los nodos (*downlink*).

Asumiendo que todos los nodos, menos el AP del bloque WiFi, tienen un valor de  $TXOP = 0$ , lo cual les permite el envío de una sola trama una vez que han conseguido el canal, se asignará el valor del  $TXOP$  del bloque WiFi en función de la expresión (5.1). Donde el valor de  $TXOP_{unitario}$  será el valor de  $TXOP$  que permite la transmisión de una sola trama, una vez que se ha conseguido el medio, y vendrá dado por el tamaño medio de paquete del tipo de categoría de acceso (AC\_VO, AC\_VI, AC\_BK o AC\_BE) que se este modificando [3].

$$TXOP_{BloqueWiFi}(AC) = (n - 1) * TXOP_{unitario} \quad (5.1)$$

#### 5.4.2.1. Valores de los parámetros de contienda EDCA

La configuración de los parámetros  $CW_{min}$ ,  $AIFS$  y  $TXOP_{limit}$  en las tarjetas inalámbricas Atheros de los equipos WiFi (bloque WiFi, y QSTA) se lleva a cabo mediante la herramienta `iwpriv` que provee el driver MadWiFi para este propósito. La configuración del parámetro  $AIFSN$  debe ser elegido entre 0 y 15 que son los límites que establece MadWiFi, el  $CW_{min}$  y  $CW_{max}$  deberán tomar valores de la forma  $2^n - 1$  y su límite máximo es 32767 y el parámetro  $TXOP_{limit}$  es un valor entero que tiene un límite superior de 8192 y que además se establece a múltiplos de 32, de forma que si se introduce un valor erróneo, automáticamente se reconfigura al múltiplo de 32 más cercano. Su valor mínimo será 64, ya que cuando se le asigna un valor menor a este parámetro en el driver no se comporta de forma adecuada.

En la etapa de pruebas se mencionará con detalle los valores que tomarán los parámetros de contienda de acuerdo al escenario en cuestión, se propone partir de los parámetros establecidos en el estándar (Tabla 2.2.1) y observar el efecto de cada uno de los parámetros.



## Capítulo 6

# Validación de la Propuesta de Integración

En el capítulo anterior, se ha descrito la estrategia de integración para equipos 802.11e-EDCA/802.16 con soporte de calidad de servicio. Esta propuesta combina las características del estándar IEEE 802.16, las del estándar IEEE 802.11e-EDCA y las del modelo de Servicio Diferenciados, de forma que se mejora el soporte de QoS para diferentes tipos de tráfico en una red heterogénea, con segmentos WiMAX y WiFi.

Para realizar la validación de la estrategia de integración propuesta, se ha montado un escenario punto-multipunto descrito en la primera parte de este capítulo, junto con la metodología experimental utilizada y las limitaciones consideradas. En un segundo apartado, se detallan las pruebas realizadas para validar la propuesta. El capítulo finaliza con la presentación de los resultados obtenidos, analizando los diferentes casos por orden de complejidad en cuanto al correcto funcionamiento del sistema y los beneficios alcanzados.

### 6.1. Descripción del Escenario de Pruebas

Para la realización de las pruebas de validación de la estrategia de integración, se han montado en laboratorio dos escenarios principales, que ejemplifican a una red heterogénea formada por un segmento de red WiMAX y uno WiFi. Estos escenarios están integrados por los equipos descritos en el Capítulo 4.

En todos los escenarios usados en este proyecto, se ha emulado un sistema híbrido WiFi-EDCA+WiMAX mediante una SS WiMAX interconectada por Fast Ethernet (100 Mbps en cada sentido) con un AP WiFi-EDCA. En primera aproximación, la interconexión de estos dos elementos por una línea cableada punto a punto de mucha más capacidad que la que pueden alcanzar las dos interfaces inalámbricas debe dar resultados sustancialmente parecidos a los que se obtendrían con un prototipo hardware más integrado con una única unidad de cómputo con suficientes recursos hardware y dos interfaces radio: una WiFi EDCA y otra WiMAX.

El primer escenario al que llamaremos “Escenario No 1” se muestra en la Figura 6.1; en él, un ordenador está conectado a la BS-WiMAX por un cable Ethernet punto a punto, y otro está conectado de la misma forma a una estación WiFi que denominaremos QSTA; la BS se conecta por WiMAX con el sistema híbrido, y éste se conecta por WiFi EDCA con la QSTA.

Los ordenadores conectados a los equipos WiMAX y WiFi son los encargados de realizar la inyección de tráfico para la realización de las pruebas y también de almacenar la información recopilada sobre la información enviada.

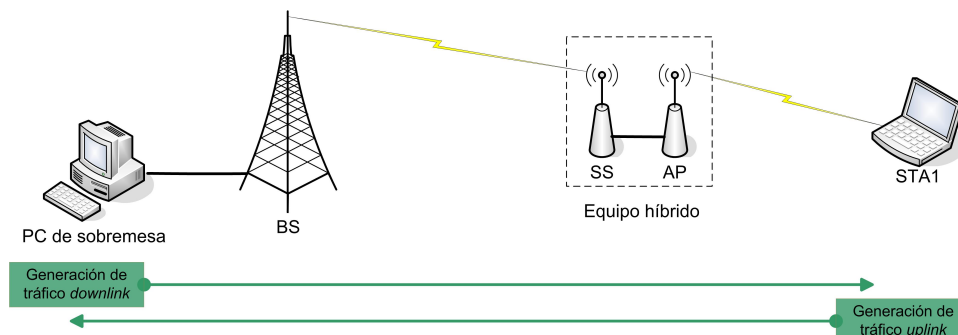


Figura 6.1: Escenario de pruebas N°1

El “Escenario N°2” mostrado en la Figura 6.2, se estructura de la misma forma que el Escenario 1, pero en este caso son dos las estaciones que están asociadas a punto de acceso del bloque WiFi (QSTA1 y QSTA2), lo cual nos permitirá observar el comportamiento de flujos internos presentes en la red WiFi.

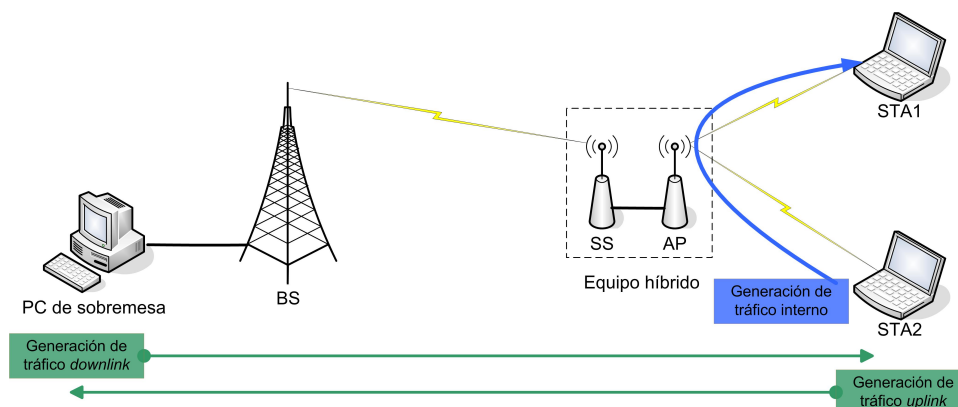


Figura 6.2: Escenario de pruebas N°2

### 6.1.1. Metodología y consideraciones previas

La metodología experimental que se siguió para realizar de las pruebas de validación se enumera a continuación; en cada apartado se describen brevemente los pasos que se siguieron para su ejecución, de tal forma que se tuviera un control sobre la mayoría de los factores que intervienen en la realización de las pruebas.

#### 1. Configuración de los equipos

La red que forman los equipos WiMAX es una configuración en modo `bridge` que permite que se asigne a cada equipo una única dirección IP que será la misma en todas sus interfaces (RF y Ethernet), lo que evita la configuración de cada una de ellas por separado, se fijó la frecuencia de operación a 5.530GHz. Además, se aprovisionaron tres flujos

en cada sentido de la comunicación, que corresponden a tres de los cuatro tipos de tráfico descritos anteriormente, mediante la interfaz Web proporcionada por el fabricante.

Los equipos WiFi se configuraron mediante las funcionalidades provistas por el driver MadWiFi y algunas herramientas de Linux (`ifconfig` e `iwconfig`). Primero, se asignaron direcciones IP a cada una de las interfaces (radio y Ethernet). Las interfaces inalámbricas se configuraron en modo 802.11g a una frecuencia de 2.447 GHz, y se fijaron los siguientes parámetros: tasa de transmisión a 18 Mbps (lo cual se explicará enseguida), potencia de transmisión a 19 dBm (donde se conseguía el mejor nivel de señal), se estableció el canal 8 para realizar las pruebas (después de un escaneo de las redes WiFi presentes en el laboratorio, se identificó que este canal era el más libre del espectro), también se eligieron los parámetros adecuados de diversidad (`Diversity`), antena transmisora (`Txantenna`) y antena receptora (`Rxantenna`) de acuerdo a las ranuras utilizadas por la tarjeta inalámbrica y a la ubicación de la antena. Todas estas configuraciones fueron establecidas en los ficheros correspondientes de configuración del sistema, de forma que cada vez que se enciendan los equipos, se configuran las interfaces de forma automática.

Finalmente, en los ordenadores y portátiles utilizados también se configuraron las direcciones IP de sus interfaces Ethernet y fue necesaria la creación de una cola `pfifo` con límite de 1000 paquetes<sup>1</sup>, para lograr un tratamiento uniforme del tráfico en este tramo de la red.

## 2. Configuración de las rutas

Además de las direcciones IP, es necesario el establecimiento de las rutas necesarias en todos los equipos (equipos WiMAX, equipos WiFi y ordenadores utilizados como estaciones terminales) para que exista conectividad extremo a extremo en toda la red. También se realizaron los pasos necesarios para que todas las rutas se configuren automáticamente al encender los equipos.

## 3. Desactivar las funcionalidades de Atheros

Los *chipset* de Atheros utilizados en los equipos WiFi, tienen activadas por defecto algunas funcionalidades propietarias de Atheros cuyo objetivo es el de mejorar la comunicación inalámbrica de estos equipos, estas funcionalidades podrían cambiar de cierta forma el comportamiento de la red WiFi. Por lo que se decidió que para la realización de todas las pruebas, éstas fueran desactivadas evitando así que factores externos pudieran afectar los resultados.

## 4. Sincronización de equipos

---

<sup>1</sup>La finalidad de crear una cola `pfifo` en la interfaz, es debido a que la cola `pfifo-fast` que tienen las interfaces por defecto, asignan cada paquete que llega a una banda según su campo ToS, priorizando unos paquetes sobre otros en función de este campo. Para ver el efecto de la propuesta de integración es necesario que se descarten todos los factores que pudieran de cualquier forma priorizar el tráfico.

Para que las medidas de retardo y *jitter* que se toman en las pruebas sean válidas y no nos encontremos con resultados erróneos, por ejemplo tiempos negativos en las mediciones, es necesario que los equipos que inyectan y reciben el tráfico con el D-ITG estén sincronizados. Para llevar a cabo esta sincronización se estableció una red cableada adicional mediante Ethernet, entre los tres ordenadores que intervienen en las pruebas. El ordenador conectado a la BS-WiMAX fue configurado como servidor mediante el programa `chrony` de Linux, y a su vez los dos portátiles se sincronizaban automáticamente con este servidor mediante las utilidades `ntpdate` y `watch` también de Linux; de esta forma nos aseguramos que en cada instante de tiempo los equipos estén sincronizados.

### 5. Medición del ancho de banda disponible en la red WiMAX y WiFi

Es importante conocer el ancho de banda que ofrece el medio de transmisión (en este caso particular, el medio inalámbrico en todos los segmentos de red presentes en el escenario de pruebas), de tal forma que se pueda establecer un reparto de las capacidades de dicha red entre los diferentes tipos de tráfico; además, conociendo este valor se pueden establecer los límites de saturación de la red.

La BS WiMAX proporciona en cada instante de tiempo el valor de la capacidad total del enlace en su interfaz Web; de esta forma podemos saber que el ancho de banda disponible en el enlace BS-SS es en promedio de 29.5 Mbps.

Para conocer la capacidad en la red WiFi, se han realizado medidas del caudal disponible mediante el inyector de tráfico D-ITG a las distintas velocidades que permite el modo 802.11g (54, 48, 36, 24, 18, 12, 9 y 6 Mbps). Para ello, primero se han desactivado las opciones propietarias de Atheros, las opciones WMM del driver Madwifi (con lo que se desactiva la funcionalidad EDCA de los equipos) y se han creado colas `pfifo` con un límite de 1000 paquetes, en todas las interfaces de los equipos WiFi (AP y STA's). La finalidad de estos ajustes, es evitar que cualquiera de ellos influya en la toma de medidas. Posteriormente, se ha inyectado un flujo de tamaño mayor que la tasa máxima establecida, con la finalidad de saturar al canal inalámbrico y se han realizado medidas de caudal recibido en ambos sentidos de la comunicación.

Después de analizar las medidas, se observa que con tasas altas de 54 ó 48 Mbps el comportamiento de la red es muy inestable, presentándose grandes pérdidas y un reparto asimétrico entre en el *uplink* (UP) y el *downlink*. Para velocidades menores como 36 ó 24 Mbps, el canal es más estable; sin embargo, el reparto entre UL y DL sigue siendo asimétrico. Con una tasa de 18 Mbps o inferior, el rendimiento de la red es totalmente estable, obteniéndose que el ancho de banda en el UL es de 12.5 Mbps y en el DL es de 13 Mbps, lo que nos da un balance entre ambos casi simétrico. Por esta razón, se ha elegido una tasa de 18 Mbps como la máxima a la que se tiene un rendimiento estable que nos permitirá valorar el impacto de los mecanismos de priorización sin excesivas perturbaciones en las medidas debidas a las fluctuaciones de canal.

### 6. Inyección de tráfico bidireccional



Una vez realizada la configuración de los equipos y fijados todos los parámetros posibles con la finalidad de disminuir la variabilidad en los resultados, se procede a la inyección de tráfico bidireccional con ayuda del generador de tráfico D-ITG, descrito en el Apartado 4.3 de este PFM. Los detalles de cada prueba se detallarán en el siguiente apartado.

## 7. Generación de ficheros de resultados

Durante cada inyección de tráfico, el D-ITG proporciona una funcionalidad mediante la cual se guardan ficheros con información estadística sobre los resultados, llamados ficheros de “logs”. Estos ficheros se almacenan en un servidor de “logs” definido previamente en el ordenador conectado a la BS, y gracias a ellos obtenemos de forma sencilla las medidas que nos interesan.

## 8. Procesamiento de medidas y resultados

La información recogida en los ficheros de “logs” se posprocesa mediante la misma herramienta D-ITG para obtener unos ficheros .dat que contienen la información sobre el caudal, el retardo, el *jitter* y los paquetes perdidos, de la información enviada. Y finalmente con ayuda de Matlab se procesan estos ficheros para obtener las gráficas presentadas en la sección de resultados.

Por tratarse de pruebas experimentales, hechas con equipos reales, se deben de tomar en cuenta algunas consideraciones y limitaciones importantes que surgen al momento de realizar las pruebas, las cuales se enlistan a continuación:

- Las pruebas se llevaron a cabo en un entorno controlado de laboratorio en donde es inevitable la presencia de otras redes WiFi, funcionando en las bandas de 2.4 GHz y de 5GHz, lo que podría en algún momento perturbar el comportamiento de la red inalámbrica, debido al exceso de colisiones.
- Como se mencionó en el Apartado 5.4.2.1, el driver MadWiFi establece ciertos límites a los valores que pueden asignarse a los distintos parámetros de contienda de EDCA, lo que hay que tomar en cuenta a la hora de asignar dichos valores.
- Debido a un bug del driver Madwifi, aún sin solucionar, la primera cola correspondiente a AC\_BE no es configurable. Por ello, se decidió que las pruebas se realizarán utilizando únicamente las tres colas configurables, con la finalidad de tener un control total sobre ellas. Esto implica que sólo se trabajará con tres tipos de tráfico: el de voz, el de vídeo y uno que denominaremos “datos” que será tratado como el tráfico de menor prioridad; es por esto que sólo se aprovisionaron tres flujos en las BS WiMAX.
- Debido a la aleatoriedad en el canal inalámbrico, al generador de tráfico y/o a los mismos equipos, se podría presentar una variabilidad en los resultados que se puede reducir mediante un número apropiado de repeticiones. Tras sucesivas pruebas y debido a la similitud en los resultados se decidió se realizarían 10 repeticiones durante un tiempo de 60 seg. cada una, lo cual nos da un total de 600 muestras.

## 6.2. Diseño de pruebas de verificación

Una vez establecida la metodología que se seguirá en los experimentos, las consideraciones previas que podrían influir en los resultados y conocidos los escenarios de trabajo, tenemos que describir las pruebas que se llevarán a cabo para verificar el buen funcionamiento de la propuesta de integración.

Lo primero que se debe garantizar para que dicha propuesta funcione adecuadamente es que los paquetes que circulan por la red estén marcados, de tal forma que puedan ser mapeados por cada una de las tecnologías involucradas en la red híbrida y puedan ser tratados por todas ellas según sus requerimientos de QoS; en este caso haría falta una herramienta que realice este marcado, ya sea en función de la aplicación o mediante el número de puerto o dirección IP. Para la realización de las pruebas de validación en este proyecto será el generador de tráfico quien marque los paquetes. El correcto marcado de los paquetes se verificó mediante *Wireshark*, enviando flujos marcados con el D-ITG y capturando los paquetes en un portátil en modo monitor.

Para todas las pruebas se marcarán los paquetes con los valores mostrados en la Tabla 6.1, de acuerdo con lo establecido en la Sección 5.2.

Campo DS	Valores DSCP	Clase DSCP	Categoría de acceso EDCA	Tipo de tráfico
0b10111000 / 0xb8	101110 / 0x2e	EF	AC_VO	Voz
0b10100000 / 0xa0	101000 / 0x28	CS5	AC_VI	Vídeo
0b00100000 / 0x20	001000 / 0x08	CS1	AC_BK	Datos
0b00001000 / 0x08	000010 / 0x02	CS1	AC_BK	Tráfico interno

Tabla 6.1: Propuesta de marcado de tráfico durante las pruebas de funcionamiento de la estrategia de integración

En cuanto a la generación de tráfico, los cuatro tipos de tráfico se han generado en D-ITG con paquetes UDP de 1500 bytes. La inyección de flujos múltiples con dicha herramienta se realiza mediante *scripts* que contienen las características de cada uno de los flujos; un ejemplo de esto se muestra a continuación:

---

```
-m owdm -a 10.0.2.2 -rp 9001 -b 0xb8 -T UDP -t 60000 -C 209 -c 1472
-m owdm -a 10.0.2.2 -rp 9002 -b 0xa0 -T UDP -t 60000 -C 84 -c 1472
-m owdm -a 10.0.2.2 -rp 9003 -b 0x20 -T UDP -t 60000 -C 417 -c 1472
```

---

Finalmente, es importante mencionar, que no se realizarán pruebas cuando las redes involucradas en los escenarios presentados no estén saturadas, es decir, cuando el tráfico que se este cursando se transmita sin ningún problema. En este caso, la configuración de colas DiffServ

<sup>1</sup>Wireshark, antes conocido como Ethereal, es un analizador de protocolos utilizado para la monitorización de redes, análisis de tráfico o detección de intrusos.

elegida y el trabajar con valores mínimos de los parámetros de contienda ( $CW_{min}$  y  $AIFS_N$ ) sumado a la QoS parametrizada de la red WiMAX, bastarían para lograr una disminución en el retardo de los paquetes, pues maximizar el caudal no es una prioridad ya que todos los nodos están cursando todo el tráfico deseado, este tratamiento proporcionaría un óptimo desempeño de los parámetros de QoS definidos.

El caso que nos interesa abordar es cuando cualquiera de los tipos de tráfico o varios de ellos a la vez saturan a la red impidiendo que otros flujos puedan ser cursados y/o degradando la QoS de los flujos que están siendo cursados en el momento de la congestión. Es por ello, que las pruebas de verificación de esta propuesta de integración se realizarán enfocándonos en los casos de saturación de la red WiFi.

En las pruebas, nos interesa verificar que en estas condiciones, la red WiFi funciona adecuadamente priorizando unos flujos sobre otros y permitiendo que la QoS de cada una de ellos se mantenga en todo momento. En este sentido, no nos interesa saturar a la red WiMAX ya que dada su naturaleza parametrizada, esta tecnología ya funciona en estas condiciones y nos garantiza la QoS definida a cada flujo provisionado, por lo que en ningún momento se saturará a la red WiMAX, pues esto aumentaría considerablemente el retardo de la red.

### 6.2.1. Pruebas sin Calidad de Servicio

Todas las pruebas que se describen en el siguiente apartado se realizarán también sin QoS en la red WiFi, ya que como se mencionó anteriormente no nos interesa poner a prueba a la red WiMAX. La propuesta de integración aquí presentada pretende que con los ajustes descritos en el Capítulo 5, se garantice en la medida de lo posible calidad de servicio extremo a extremo en un red híbrida.

La finalidad de realizar las pruebas sin QoS en WiFi es tomar una referencia con la que comparar para que se puedan observar los beneficios que se tienen cuando se proporciona QoS en cada segmento que forma la red.

Para lograr que la red WiFi funcione con el método tradicional en modo 802.11g, sin ningún mecanismo de QoS, se realizaron las siguientes acciones: desactivar las funcionalidad propietarias de Atheros, desactivar el mecanismo EDCA en los equipos WiFi y crear colas `pfifo` con un límite de 1000 paquetes en todas las interfaces de los equipos WiFi y los ordenadores.

### 6.2.2. Pruebas con Calidad de Servicio

Las pruebas descritas en este apartado representan la forma en la que se validará el funcionamiento de la propuesta de integración presentada en este PFM. Una vez que se hayan realizado las pruebas sin QoS, ahora se configurará lo propuesto en el Capítulo 5 en los equipos WiFi, para que se pueda verificar la capacidad que tiene el equipo híbrido para diferenciar y priorizar los diferentes tipos de tráfico, de tal forma que la QoS que se pueda tener en el segmento de red WiMAX no se pierda en la red WiFi y viceversa.

Puesto que nuestra propuesta combina dos mecanismos de priorización en distintas capas, se realizarán también estas pruebas a cada uno de los mecanismos por separado, para ver el impacto que pudiera tener cada uno de ellos.

Todas las pruebas se realizarán con ayuda del D-ITG, el cual se encargará de transmitir y recibir el tráfico generado, y realizar y almacenar las medidas que guardará en los ficheros de `logs`, para posteriormente procesarlos y obtener los resultados correspondientes.

### 6.2.2.1. Pruebas en el Escenario N°1

Se comenzará trabajando con el Escenario N°1, que es el más sencillo en el sentido de que sólo habrá dos estaciones presentes en la red ambas transmitiendo y recibiendo a la vez, es decir, se simulará un tráfico bidireccional. Se repartirá los 12.5 Mbps disponibles en la red entre los dos sentidos de la comunicación, dejando 1500 kbps, que corresponden a un 12 % de caudal total disponible, para el tráfico interno. Como se ha mencionado en el Apartado 5.4.1.1, la implementación DiffServ propuesta permite que, en el caso de que haya recursos disponibles en la red, éstos sean “prestados” a los flujos que así lo requieran en orden de prioridad, por lo que aunque en este caso no haya presencia de tráfico interno el caudal reservado a éste podrá ser utilizado por el resto del tráfico. El reparto propuesto para este escenario se muestra en la Tabla 6.2.

Cabe mencionar, que esta propuesta de reparto entre los flujos es simplemente para realizar las pruebas y ver el efecto de la configuración propuesta. Este reparto debe realizarse en función, de las necesidades de los usuarios y la capacidad medida en la red.

Tipo de tráfico	DL_min (kbps)	DL_max (kbps)	UL_min (kbps)	UL_max (kbps)
Voz	2500	4900	2500	4900
Vídeo	2000	2400	2000	2400
Datos	1000	1000	1000	1000
Tráfico Interno	750	750	750	750

Tabla 6.2: Reparto del caudal disponible.

El reparto mostrado en la tabla anterior se verá reflejado en los valores que se asignarán a los parámetros de configuración de caudal (`rate` y `ceil`), para el caso bidireccional en el que se considera un ancho de banda de 5.5 Mbps en cada sentido de la comunicación, lo cual se muestra en la Tabla 6.3.

Resta por mencionar los valores que tomarán los parámetros de contienda EDCA de la capa MAC de WiFi; como se sugirió en el Apartado 5.4.2.1, se partirá de los valores propuestos en el estándar, los cuáles se muestran en la Tabla 6.4.

Todos estos ajustes y configuraciones se realizan mediante un *script* en `bash`, que se ejecuta en el bloque WiFi, el cual se adjunta en el Apéndice A.

Antes de describir las dos pruebas de este apartado, conviene aclarar dos términos que se utilizarán durante la descripción y análisis de las pruebas. El primero de ellos es el de  *saturación*

<sup>5</sup>La notación “kbit” es la utilizada por la utilidad `tc` para denotar el caudal en kbit/s

Parámetro rate		Parámetro ceil	
Variable	Valor	Variable	Valor
Capacidad_WiFi	12500 kbit <sup>5</sup>	Capacidad_WiFi	12500 kbit
MinRate_QoS	4500 kbit	MaxRate_QoS	5500 kbit
MinRate_Voz	2500 kbit	MaxRate_Voz	4900 kbit
MinRate_Video	2000 kbit	MaxRate_rtPS	2400 kbit
MinRate_Datos	1000 kbit	MaxRate_nrtPS	1000 kbit
MinRate_INT	1500 kbit	MaxRate_INT	1500 kbit

Tabla 6.3: Valores de los parámetros de configuración (rate y ceil) para DiffServ

Parámetro	$CW_{min}$	$CW_{max}$	$AIFS_N$	$TXOP_{limit}$
AC_VO	3	7	2	64
AC_VI	7	15	2	64
AC_BK	15	1023	3	64

Tabla 6.4: Valores de los parámetros de configuración EDCA

con el cual nos estaremos refiriendo a que se está enviando una cantidad de información coincidente con el caudal máximo de un tipo de tráfico, sin exceder el límite propuesto. En cambio, cuando hablemos de **sobresaturación**, se estará enviando más tráfico que el límite asignado. En este sentido, el tráfico de voz se transmitirá en saturación en todas las pruebas, mientras que los flujos de vídeo y datos se podrán enviar en cualquiera de las dos formas dependiendo de la prueba.

### 1. Transmisión de flujos Voz en saturación + Datos en sobresaturación

En este caso se generaran tres flujos, dos para cada tipo de tráfico. De voz se inyectarán 2500 kbps con lo cual conseguimos que el caudal asignado a este flujo se encuentre saturado; de vídeo se transmitirán 1500 kbps en cada sentido, este flujo no estará en saturación; finalmente del flujo de datos se inyectarán 5000 kbps, lo que conseguirá sobresaturar al canal. Se debe observar que la QoS del tráfico de Voz y Vídeo no debe ser afectada por la presencia de la enorme cantidad de tráfico de datos que se inyecta a la red, es decir, que se deben observar valores de retardo y *jitter* bajos para los flujos más prioritarios a la vez que se garantiza su caudal mínimo establecido; y que una vez que se garanticen estos requerimientos se podrá cursar con lo que quede disponible en el canal el tráfico menos prioritario.

### 2. Transmisión de flujos Voz en saturación + Vídeo + Datos en sobresaturación

Ésta segunda prueba consiste en inyectar al igual que en el caso anterior tres flujos; con la diferencia de que ahora se transmitirá el flujo de vídeo en sobresaturación, de tal forma que: los flujos de voz serán de 2500 kbps, los de vídeo de 4000 kbps al igual que los de datos; con estos valores se consigue sobresaturar a la red. Se debe observar que se asignen correctamente los requerimientos de QoS a cada uno de los flujos presentes en orden de

prioridad; además, se debe comprobar que el tráfico más prioritario no se ve afectado en sus parámetros de QoS y el tráfico menos prioritario sólo se transmitirá si hay recursos disponibles en la red, en caso contrario estos flujos serán rechazados.

### 6.2.2.2. Pruebas en el Escenario N°2

Las pruebas que se realizarán en este Escenario N°2, partirán de las configuraciones hechas en el Escenario anterior con la diferencia de que se reconfigurarán las colas en las 2 QSTA's, dividiendo el caudal disponible en UL entre las dos estaciones, en tanto que en el bloque WiFi se mantendrá la misma configuración en UL y DL. Los valores de los parámetros de contienda serán los mismos con excepción del  $TXOP_{limit}$ , el que ahora valdrá el doble en el AP, es decir, 128 y 64 para las QSTA's, de acuerdo con lo establecido en la Sección 5.4.2.1 del Capítulo anterior, pues ahora son tres los nodos presentes en la red WiFi, con lo cual se pretende conseguir un reparto equitativo entre UL y DL.

En este caso, como se tienen tres estaciones se simulará una comunicación bidireccional en todos sentidos, es decir, el ordenador conectado a la BS transmitirá a ambas STA's y ambas estaciones transmitirán al ordenador. Las cuatro pruebas que se realizarán en este apartado se describen a continuación:

#### 1. Sin presencia de tráfico interno.

En este primer caso no existe presencia de tráfico interno, por lo que sólo se verán los efectos que hay en el comportamiento del sistema cuando se agrega un nodo más del lado de la red WiFi.

##### a) *Transmisión de flujos Voz en saturación + Datos en sobresaturación*

Igual que en caso anterior, en esta prueba los flujos de vídeo no saturarán su caudal asignado y cada ordenador transmitirá 1250 kbps de tráfico de voz, 750 kbps de tráfico de vídeo y 2500 kbps de tráfico de datos, con lo que se consigue tener el canal en sobresaturación. En este caso, además de observar que se mantengan los requerimientos de QoS de cada uno de los flujos se podrá ver el impacto que tiene el introducir un cliente más en el lado WiFi, ya que cuantos más clientes conectados a la red WiFi haya, las probabilidades de colisión en dicha red aumentan.

##### b) *Transmisión de flujos Voz en saturación + Vídeo + Datos en sobresaturación*

La preservación de los requerimientos de QoS debe observarse en todos los escenarios posibles, por lo que en este apartado cada ordenador transmitirá: 1250 kbps de tráfico de voz, 2000 kbps de vídeo y 2000 kbps de datos, lo que sobresaturará a la vez el caudal asignado a cada tipo de tráfico, excepto la voz que será saturado. Se debe observar cómo influye la presencia de un nuevo nodo en la provisión de QoS extremo a extremo.

#### 2. Con presencia de tráfico interno.

Como segunda parte de esta batería de pruebas correspondientes al Escenario N°2, se propone la inyección de tráfico interno entre las 2 STA's, lo que nos permitirá apreciar como incluso con la presencia de tráfico interno en la red las comunicaciones extremo a extremo no se ven afectadas, gracias al tratamiento diferenciado que estamos dando a los diferentes tipos de tráfico.

*a) Transmisión de flujos Voz en saturación + Datos en sobresaturación*

En esta prueba, se transmitirán exactamente los mismos flujos que en el caso 1-a), pero se sumarán dos nuevos flujos que simularán al tráfico interno, cada uno será de 1500 kbps.

*b) Transmisión de flujos Voz en saturación + Vídeo + Datos en sobresaturación*

Finalmente, esta prueba se realizará inyectando el mismo tráfico que en el caso 1-b), pero con la presencia de tráfico interno bidireccional, es decir, la STA1 inyectará 1000 kbps a la STA2 y viceversa.

Los resultados que se han obtenido a partir de la realización de las pruebas descritas en esta sección se presentan a continuación.

## 6.3. Presentación de Resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados derivados del uso de la estrategia de integración propuesta sobre los diferentes escenarios que se han descrito en el apartado anterior.

Se comenzará con el análisis de los casos más sencillos que se realizaron en el Escenario N°1, donde sólo existe una estación del lado de la red WiMAX y una en la red WiFi, las cuales se envían tráfico bidireccional, y posteriormente se presentarán escenarios en donde existen dos estaciones del lado de la red WiFi.

Para poder obtener información relevante sobre la provisión de QoS en la red híbrida, se analizó el comportamiento de los cuatro parámetros más importantes que se deben tomar en cuenta cuando se habla de QoS: el caudal, el retardo, el *jitter* y los paquetes perdidos, cuyos valores recomendados por la ITU de acuerdo al tipo de tráfico se presentaron en la Tabla 5.2 del Capítulo 5.

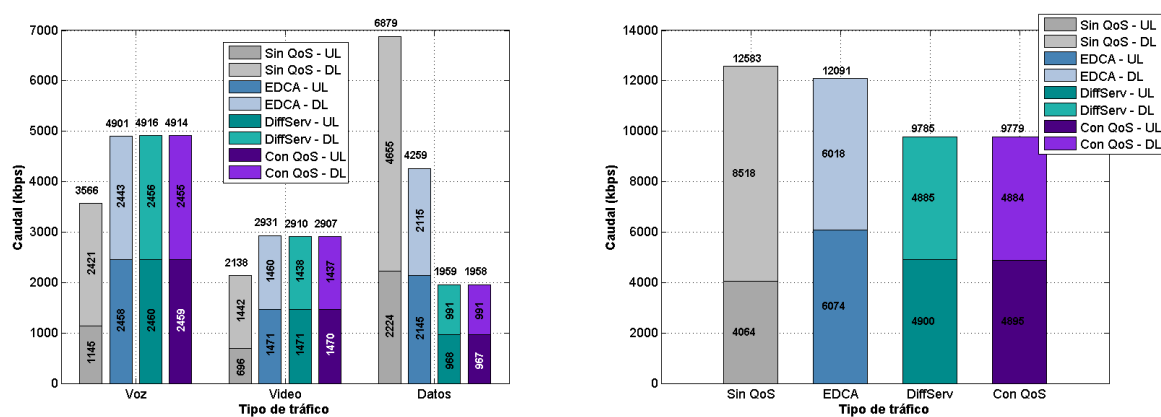
### 6.3.1. Escenario de pruebas N°1

Los resultados de la primera prueba propuesta, se mencionan en este apartado. Esta se realizó dentro del Escenario de pruebas N°1, el cual esta formado por una única estación asociada al equipo híbrido y se compone de dos pruebas principales.

*1.a) Transmisión de Voz en saturación + Datos en sobresaturación.*

Uno de los parámetros importantes que debemos analizar cuando se habla de garantizar QoS es el caudal, ya que el no garantizar un ancho de banda mínimo a las aplicaciones de tiempo real, harían en determinadas circunstancias inviable la comunicación, en el mejor de los casos causando una baja calidad de la comunicación, llegando incluso a provocar la pérdida de la comunicación en caso de una alta congestión en la red. Es importante garantizar que el caudal mínimo asignado a este tipo de tráfico esta siempre disponible, y que no se verá afectado por ningún otro tipo de tráfico.

En la Figura 6.3, se pueden observar los promedios del caudal en las cuatro situaciones propuestas. La gráfica (a) representa los flujos UL y DL de cada tipo de tráfico, mientras que en la (b) se proporciona el reparto del caudal total, también en ambos sentidos. La primera columna de cada tipo de tráfico contiene los resultados obtenidos cuando se han aprovisionado los flujos correspondientes en los equipos WiMAX, y no se tienen mecanismos de QoS en los equipos WiFi; la segunda representa el resultado promedio obtenido cuando se configuran los parámetros de contienda EDCA; la tercera corresponde a la configuración única de DiffServ y la cuarta y última columna es la que recoge los resultados cuando se implementan ambos mecanismos propuestos (EDCA e DiffServ).



(a) Caudal por tipo de tráfico en sentido UL/DL

(b) Reparto de caudal total entre UL/DL

Figura 6.3: Análisis del caudal. Prueba 1.1.a)

En la primera columna de la Figura 6.3 (a), se observa que aunque en el segmento WiMAX existe QoS parametrizada, esto no es suficiente para garantizar una calidad extremo a extremo, pues en media el caudal mayor es el del flujo de datos con un total de 6879 kbps, pasando por encima de los flujos de voz y vídeo; además, el reparto entre DL y UL es asimétrico siendo mayor el primero. En las siguientes tres columnas, se aprecia que la correcta parametrización de EDCA da lugar a un resultado casi óptimo por sí sola, al igual que el caso de DiffServ y por consiguiente en el caso con ambos mecanismos. Podemos destacar, que con EDCA al no existir un mecanismo explícito que limite el caudal, a diferencia de los otros dos casos, el tráfico de datos supera los 1000 kbps.

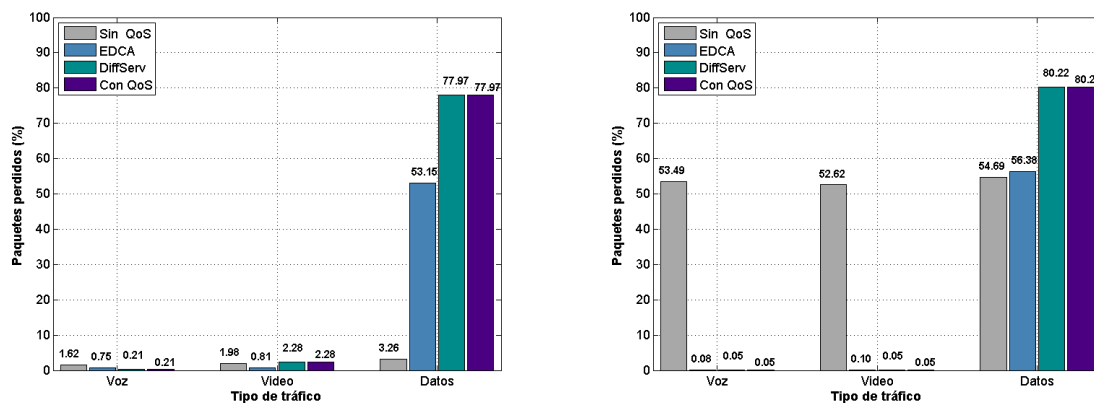
En cuanto a los promedios totales presentados en la gráfica 6.3 (b), se puede apreciar que en los tres casos se consigue simetría entre el DL y UL, y que con EDCA se tiene un caudal de 12091 kbps superior al conseguido en otros dos los casos, debido al límite previamente establecido.

Otro parámetro asociado al ancho de banda, es la cantidad de paquetes que se pierden en una comunicación; que sus valores no sean muy grandes es muy importante para que las aplicaciones en tiempo real se puedan llevar a cabo de forma adecuada, pues si se pierden muchos paquetes en la transmisión sería imposible recuperar la información en el receptor, haciendo



inviabile a la comunicación.

En la Figura 6.4, se representa el porcentaje de paquetes perdidos en sentido DL (a) y UL (b). Sin QoS, las pérdidas en sentido DL son muy pequeñas a diferencia de UL donde sus valores superan el 50 % de paquetes perdidos, lo que es coherente con la asimetría observada en las gráficas de caudal. En los tres casos con los correspondientes mecanismos de QoS, se consigue disminuir considerablemente este porcentaje en los flujos de voz y vídeo; mientras que las pérdidas en los datos aumenta. Este comportamiento, se mejora mediante el protocolo TCP/IP, que es el que se utiliza para enviar y recibir tráfico de datos en general, pues se adaptaría al caudal disponible.



(a) Porcentaje de paquetes perdidos en sentido DL

(b) Porcentaje de paquetes perdidos en sentido UL

Figura 6.4: Porcentaje de paquetes perdidos. Prueba 1.1.a)

El siguiente parámetro que se analizará será el retardo, el cual también influye en la calidad de una comunicación. Por ejemplo, en una comunicación de voz en donde el retardo es muy grande, los mensajes transmitidos llegarán tarde a su destino, impidiendo una buena comunicación.

En el gráfico mostrado en 6.5, se muestra el retardo en milisegundos sufrido por cada tipo de tráfico. Cuando no hay QoS, se aprecia nuevamente la asimetría entre DL y UL; siendo el retardo más alto en sentido UL que en DL, esto es, cuando la información transmitida pasa primero por la red WiFi. Cuando se prueban los mecanismo de QoS, tanto EDCA, como Diffserv y con ambos mecanismos juntos, se consigue reducir considerablemente el retardo de los flujos de voz y vídeo, aumentando el de datos.

El último de los parámetros que se analizarán es el comportamiento del *jitter*, el cual se muestra en la Figura 6.6, cuyo valor en general es pequeño. En el caso de la red sin QoS, se aprecia que todos los tipos de tráfico tienen valores aceptables, ya que el máximo valor es de tan sólo 9 ms, notándose también, la asimetría entre el UL y DL que se ha venido observando a lo largo de esta prueba. En cuanto a los tres casos con mecanismos de QoS, se puede apreciar una pequeña reducción en el valor de *jitter*; y que en el caso de DiffServ y con QoS, el *jitter*

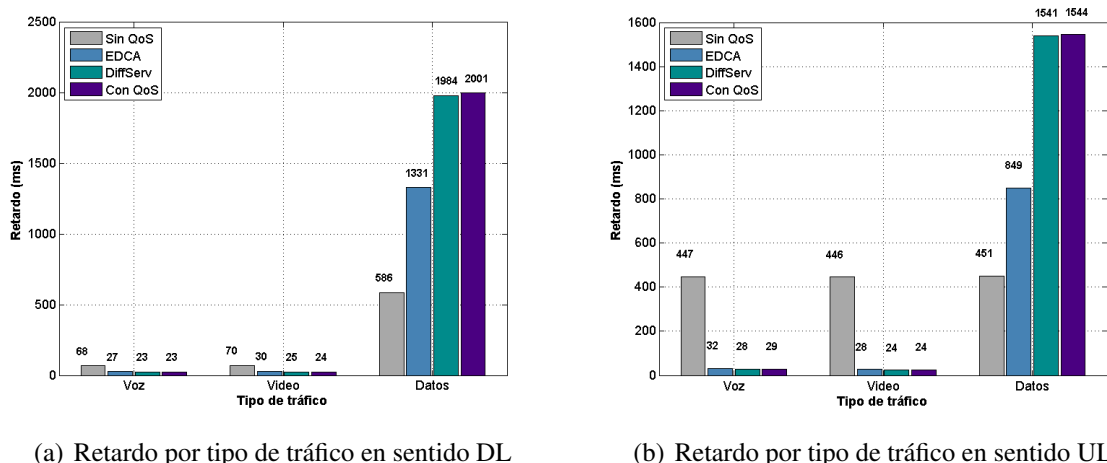


Figura 6.5: Análisis del Retardo. Prueba 1.1.a)

del tráfico de datos es bastante alto, igual que su retardo, esto se debe a que se quieren enviar 5000 kbps por la cola consiguada en DiffServ que esta limitada a 1000 kbps sin poder exceder este valor.

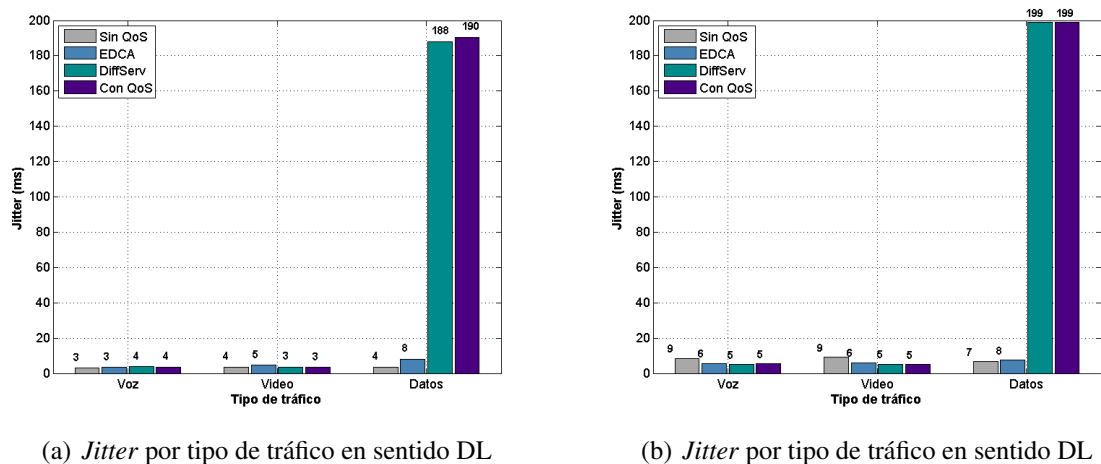


Figura 6.6: Análisis de jitter. Prueba 1.1.a)

Después de analizar el comportamiento de los cuatro parámetros que nos interesan, se aprecia, que cuando hay poca congestión en la red y un sólo cliente conectado, cualquiera de los mecanismos por sí sólo podría proporcionar una QoS adecuada; ya que en todos los casos se realiza una correcta priorización de los diferentes tipos de tráfico. Se puede destacar que con EDCA, el tráfico de datos tiene un mejor tratamiento presentando un mayor caudal y menor retardo y jitter. En DiffServ esto se puede mejorar estableciendo un margen superior a la cola con clases definida en DiffServ y/o permitiendo que este tráfico tome recursos prestados cuando haya disponibilidad en la red.

### 1.b) Transmisión de flujos voz en saturación + Vídeo + Datos en sobresaturación

En esta última prueba realizada en el Escenario N°1, se inyecta el flujo de voz en saturación (2500 kbps) y los de vídeo y datos en sobresaturación (4000 kbps); con esto se pretende mostrar cómo a pesar de que exista una gran cantidad de información de más de un tipo de tráfico, el sistema es capaz de priorizar los diferentes tipos de tráfico y mantener los requerimientos de QoS.

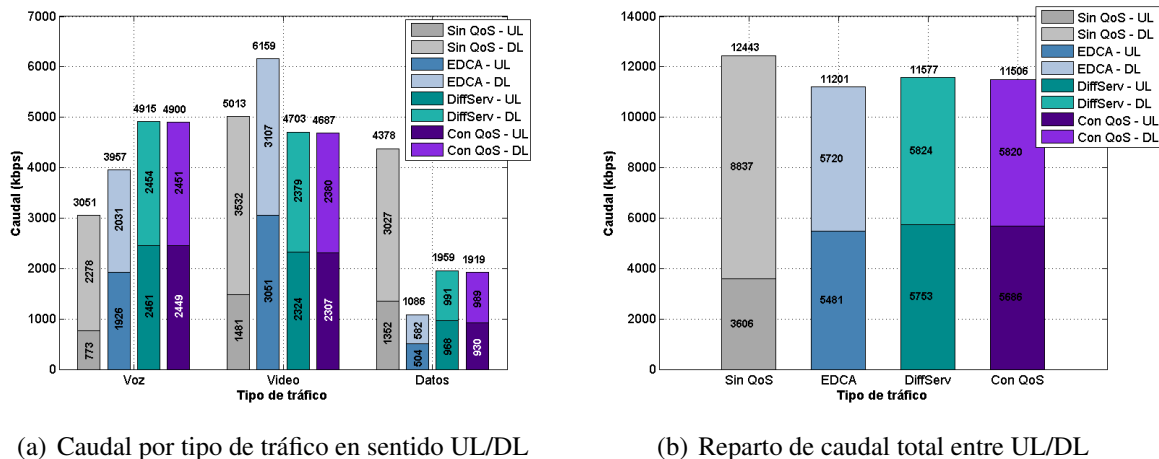
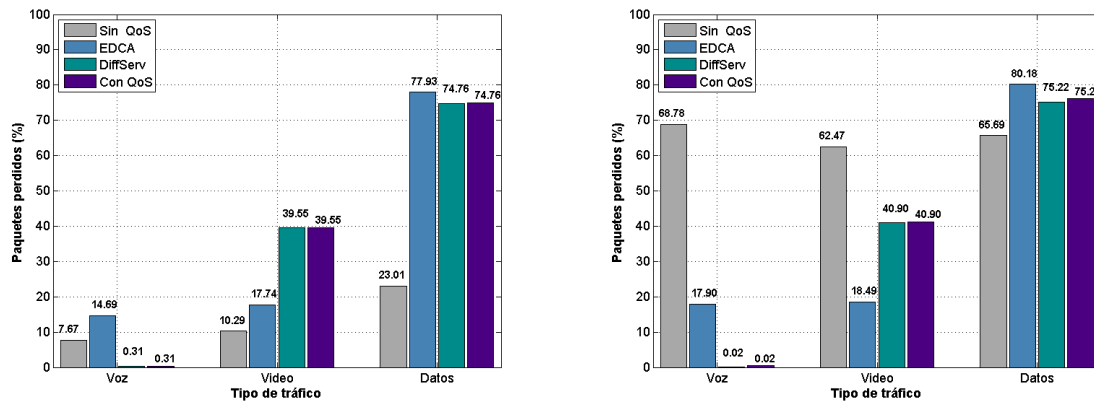


Figura 6.7: Análisis del caudal. Prueba 1.1.b)

Las gráficas de la Figura 6.7, representan el comportamiento del caudal por tipo de tráfico. En la primera columna de ambas gráficas, que corresponde al caso sin QoS, se observa al igual que en el caso anterior, un reparto asimétrico entre UL y DL; siendo bastante mayor en caudal en sentido DL. A diferencia de la prueba anterior, al inyectar una cantidad superior de tráfico de vídeo igual que la de datos, se aprecia que el caudal de voz es el más pequeño. En la segunda columna, se puede apreciar que el efecto del mecanismo EDCA ya no es tan bueno, pues en función de los parámetros configurados, los flujos de vídeo tienen un tratamiento superior a los de voz; en tanto que con DiffServ se observa un reparto correcto del caudal en función de la configuración realizada. Finalmente, en la cuarta columna que tiene un comportamiento igual a la de DiffServ, se aprecia el efecto de tener ambos mecanismos juntos. En los tres casos se consigue un reparto proporcional entre el DL y UL.

En cuanto al porcentaje de paquetes perdidos, mostrado en la Figura 6.4, se aprecia un aumento general en cantidad de pérdidas en todos los casos, debido al aumento en el tráfico que enviado. Cuando no hay QoS en comportamiento es similar al observado en la prueba anterior; en el caso del mecanismo EDCA, el porcentaje de pérdidas es más grande que el que se tiene con DiffServ y con QoS.

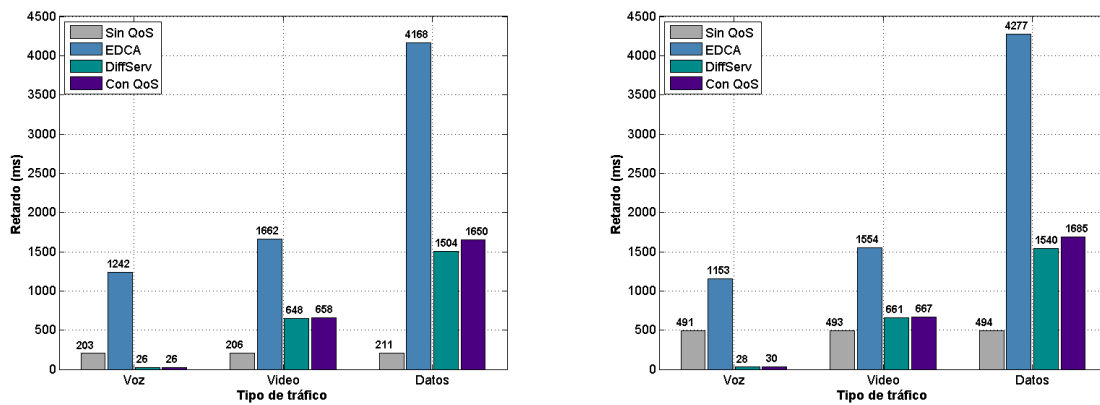
En la Figura 6.9, se presenta el comportamiento del retardo, el cual cuando no hay QoS, tiene un valor similar para todos los tipos de tráfico y es mayor en el sentido UL. Con EDCA, en la segunda columna de las gráficas, se observa que los valores de retardo para el tráfico de voz y vídeo es muy similar y bastante elevado; lo que nos indica que los parámetros que sugiere el estándar, en este caso no son óptimos o no son suficientes para lograr un tratamiento adecuado de



(a) Porcentaje de paquetes perdidos en sentido DL

(b) Porcentaje de paquetes perdidos en sentido UL

Figura 6.8: Porcentaje de paquetes perdidos. Prueba 1.1.b)



(a) Retardo por tipo de tráfico en sentido DL

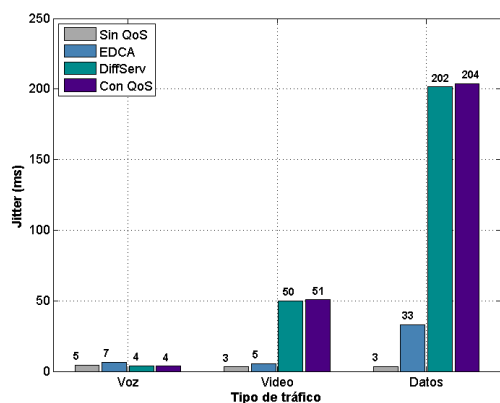
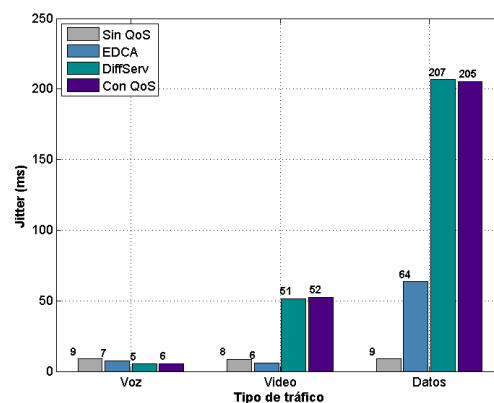
(b) Retardo por tipo de tráfico en sentido UL

Figura 6.9: Análisis del Retardo. Prueba 1.1.b)

QoS. En cambio, con DiffServ se consigue nuevamente un comportamiento óptimo, en cuanto al retardo de los paquetes. Y en la última columna que es la que implementa ambos mecanismos se puede apreciar una mayor influencia del mecanismo DiffServ.

Finalmente, los valores promedios del *jitter* se muestran en la Figura 6.10, para los flujos de voz en ambos sentidos su valor es muy pequeño, y no existe gran diferencia entre ellos. En el caso del vídeo, su valor aumenta cuando se tiene el mecanismo DiffServ y con QoS, al igual que con el tráfico de datos. En este caso el mejor comportamiento lo tiene EDCA, pero los resultados obtenidos al unir ambas tecnologías se ven influenciados en gran medida por el valor obtenido en DiffServ.

El análisis de las gráficas presentadas muestra que los mecanismos propuestos para proporcionar QoS funcionan adecuadamente. Se aprecia una priorización adecuada de los diferentes tipos de tráfico y se consigue un reparto proporcional de los valores de todos los parámetros

(a) *Jitter* por tipo de tráfico en sentido DL(b) *Jitter* por tipo de tráfico en sentido DLFigura 6.10: Análisis de *jitter*. Prueba 1.1b)

entre UL y DL. En esta prueba, se observa que el comportamiento de DiffServ es más determinante que el de EDCA, lo que se ve reflejado en los resultados de la cuarta columna, donde están presentes ambos mecanismos.

### 6.3.2. Escenario de pruebas N°2 sin tráfico interno

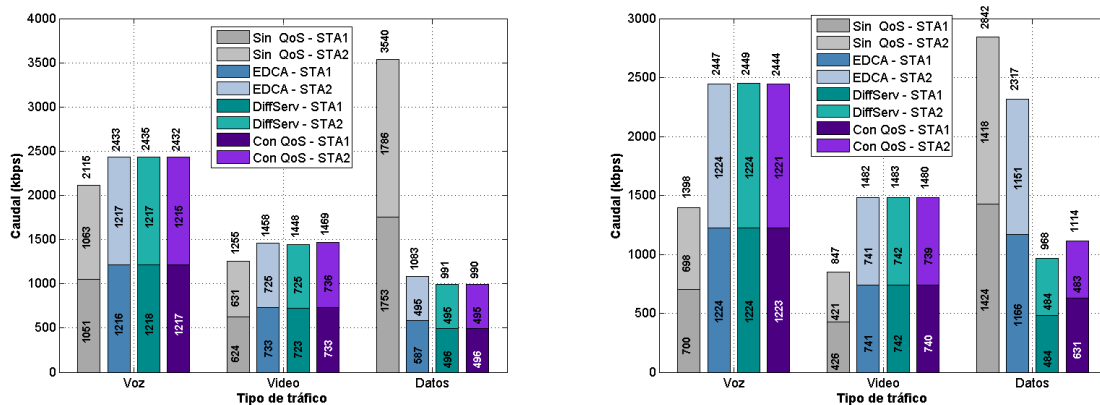
En los siguientes apartados, se muestran las pruebas hechas en el Escenario N°2 que, a diferencia del caso anterior, tiene una segunda STA que nos permitirá observar el comportamiento de la propuesta de integración aquí presentada cuando las probabilidades de colisión en la red WiFi aumentan debido a la presencia de más equipos.

#### 1.a) Transmisión de flujos Voz en saturación + Datos en sobresaturación.

Esta primera prueba es igual que la realizada en el Escenario N°1, con la diferencia de que ahora repartiremos en tráfico inyectado entre las cuatro posibilidades de comunicación que nos ofrece la red, es decir, se transmitirán flujos desde la BS a ambas STA's y desde ambas STA's se transmitirá información al ordenador conectado a la BS.

El análisis del caudal se muestra en la Figura 6.11, en donde se presentan dos gráficas; en la primera de ellas (a) se observa el comportamiento del caudal para las dos STA's en sentido DL y la segunda (b) en sentido UL.

En la primera columna, cuando no hay QoS, además de observar que los flujos de datos son mayores a los de voz y vídeo, como en la prueba 1.1a), se aprecia que, al haber una STA más en la red WiFi, hay un aumento en el caudal UL, aunque sigue siendo mayor el caudal en DL y el reparto de caudal entre STA1 y STA2 es proporcional. El comportamiento del caudal en las tres columnas con mecanismos de QoS es muy similar, en todos los casos se consigue una priorización adecuada de flujos en función de los parámetros previamente configurados. Se puede resaltar, que los flujos de datos en el caso de EDCA, en sentido UL es mayor que el DL y no se consigue un reparto proporcional.



(a) Caudal por tipo de tráfico en sentido DL

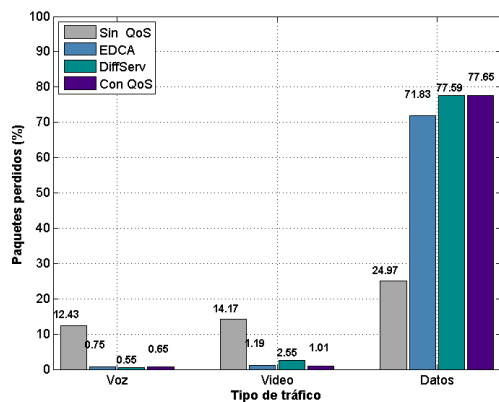
(b) Caudal por tipo de tráfico en sentido UL

Figura 6.11: Análisis de caudal. Prueba 2.1.a)

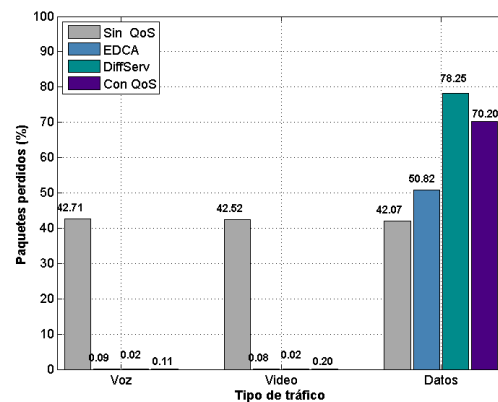
A partir de esta prueba y en adelante para el análisis del porcentaje de paquetes perdidos se proporcionarán cuatro gráficas, las primeras dos corresponden a la STA1, la gráfica (a) es la transmisión en sentido DL y la (b) en sentido UL; las gráficas (c) y (d) representan lo mismo

pero para la STA2.

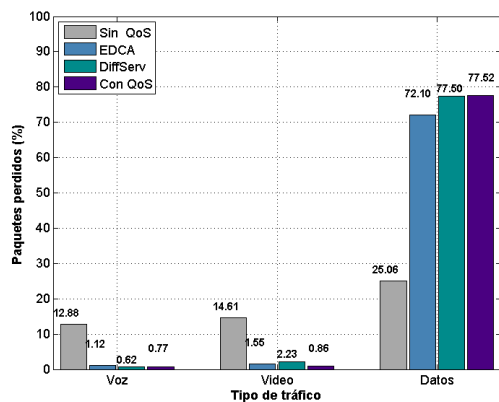
En la Figura 6.12, se presentan los promedios del porcentaje de paquetes perdidos de esta prueba; se ve que las dos STA's tienen comportamientos similares. En el caso del escenario sin QoS, las pérdidas de todos los tipos de flujos son similares; para el caso del DL su valor está entre el 12% y el 25% y en UL son mayores al 40%. En este caso, las tres columnas que representan los resultados con mecanismos de QoS se comporten de forma similar, al igual que en la prueba 1.1a), y también EDCA se comporta mejor con el tráfico de datos que DiffServ.



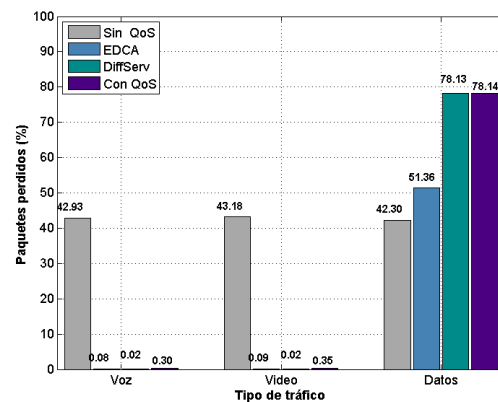
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink

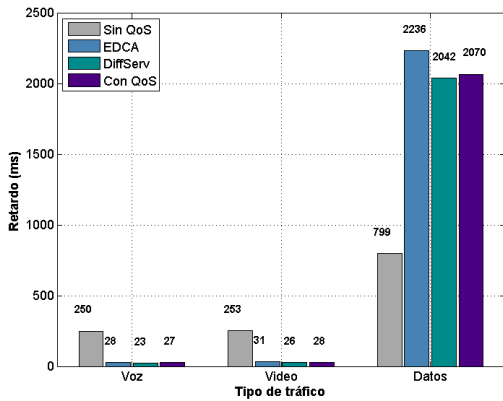


(d) STA2 - Sentido Uplink

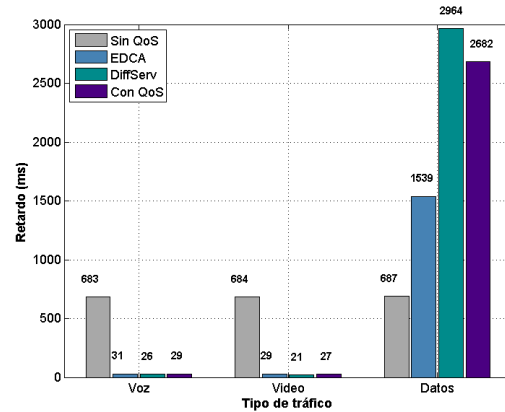
Figura 6.12: Porcentaje de paquetes perdidos. Prueba 2.1.a)

En cuanto al retardo y al *jitter*, representados en las Gráficas 6.13 y 6.14 respectivamente, el comportamiento que siguen ambos para ambas STA's es muy parecido; además se puede observar un reparto más equitativo debida a la presencia de la STA2, para el escenario sin QoS. Y en los casos donde se implementa QoS, se consiguen valores de retardo y *jitter* muy pequeños para el tráfico de voz y vídeo que aumenta bastante en los flujos de datos, debido a los parámetros configurados en cada mecanismo. Se observa que los valores de estos dos parámetros para el caso con QoS son mejores que en cualquiera de los dos mecanismos por separado, lo que justi-

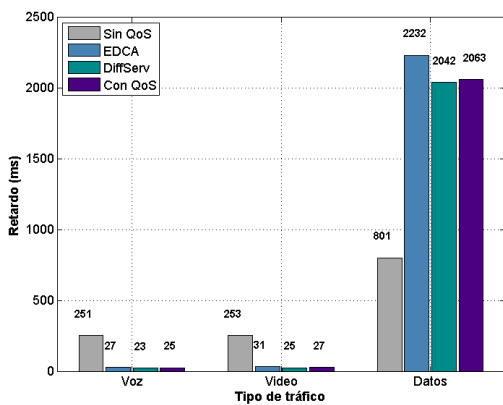
fica el uso de ambos para mejorar la QoS de todos los flujos presentes en la red.



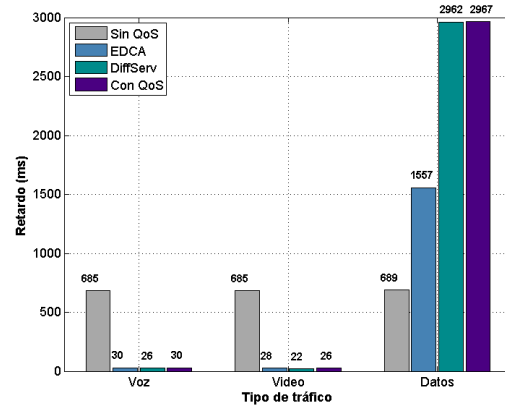
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink

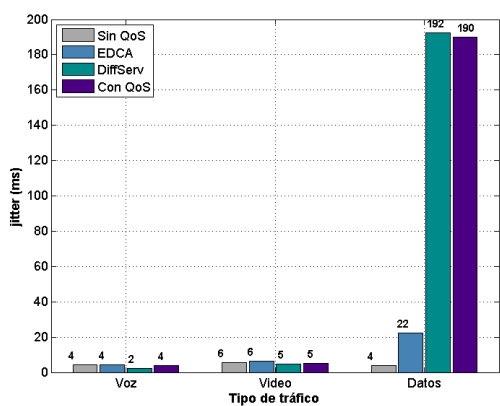


(d) STA2 - Sentido Uplink

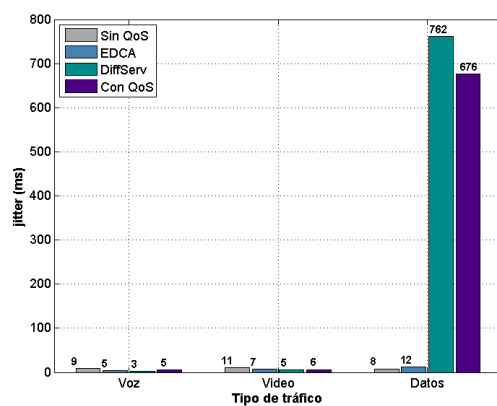
Figura 6.13: Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.1a)

Como conclusión de esta prueba, se puede decir que en los tres casos en que se tienen mecanismos de QoS se consigue priorizar correctamente los diferentes flujos, y que aunque se tenga una STA más en la red WiFi, se respetan los parámetros de QoS de los flujos. Además, en este caso se aprecia claramente que la presencia de los dos mecanismos juntos mejora los valores de los parámetros que estamos analizando.

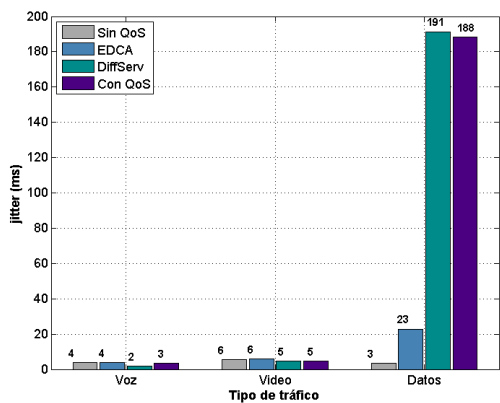




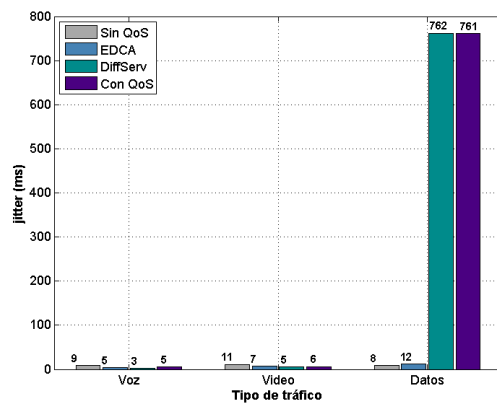
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink



(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.14: Análisis de *jitter* por tipo de tráfico. Prueba 2.1a)

### 1.b) Transmisión de flujos voz en saturación + Vídeo + Datos en sobresaturación

En esta segunda prueba, se sobresaturó al canal inalámbrico, manteniendo el caudal de la voz al límite establecido.

La Figura 6.15, muestra los valores promedio del caudal recibido en cada una de las estaciones. Nuevamente, cuando no se tiene QoS en la red, se observa que el reparto del caudal es asimétrico y que el flujo de datos es mayor en sentido DL que el resto de los flujos; en cambio en el otro sentido los flujos de vídeo y datos son proporcionales, debido a que se está enviando la misma cantidad de información de cada uno. Con el mecanismo EDCA, se observa que con los valores de parámetros de contienda configurados, no se tiene un comportamiento óptimo; no hay simetría entre DL y UL y además no se prioriza adecuadamente la voz sobre el vídeo. En cambio, con el mecanismo DiffServ se tiene un mejor reparto del caudal en función de las disciplinas de colas configuradas. Finalmente, en el caso con QoS, se observa un pequeño aumento en el caudal con respecto al caso DiffServ, y un reparto proporcional UL/DL.

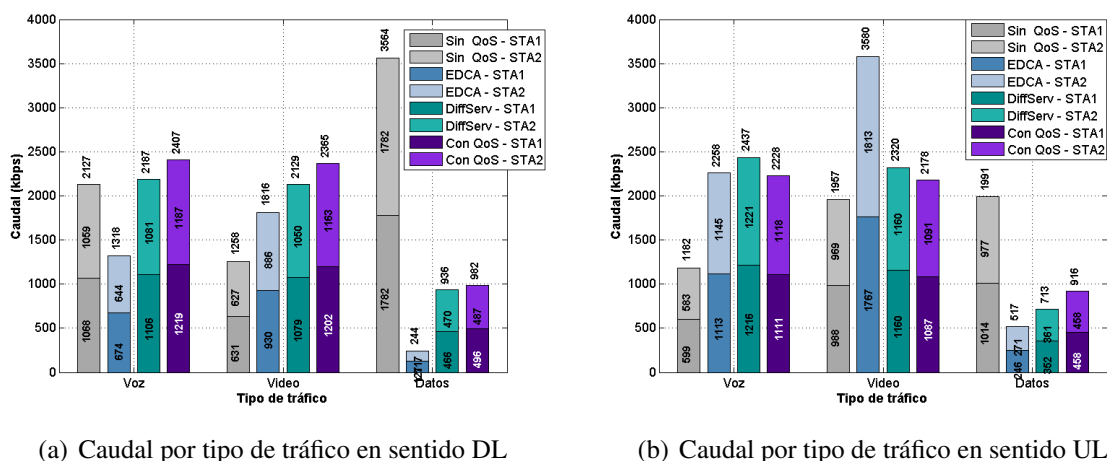
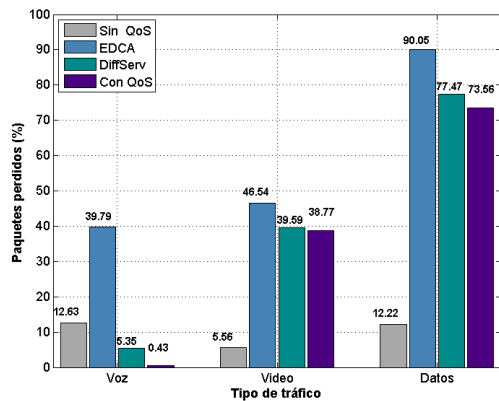


Figura 6.15: Análisis de caudal. Prueba 2.1.b)

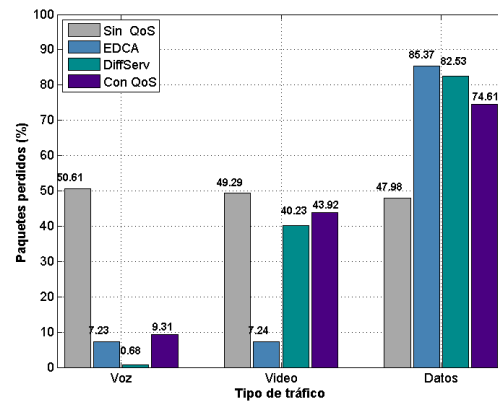
La Figura 6.16, complementa a la información que se pueda obtener del caudal, pues lo que no se recibe en el destino, se ve reflejado en un porcentaje de paquetes perdidos; de esta forma, podemos darnos cuenta que al recibir, por ejemplo, un promedio de 1068 kbps de voz en la STA1 (Gráfica (a)), de los 1250 kbps que hemos enviado, estamos perdiendo en promedio el 12.6 % de la información total enviada.

En la primera columna, en donde no se tiene QoS, se aprecia que el comportamiento es exactamente igual que en las pruebas anteriores, hay asimetría entre el reparto UL/DL, siendo mayor el DL; y además se pierde el mismo porcentaje de paquetes de cada flujo, con lo que se comprueba que no existe una correcta priorización de los flujos. En cambio en el caso de EDCA, segunda columna, se observa que aunque se diferencian los flujos más prioritarios de los menos, los valores que se obtienen no son simétricos, se tiene un mejor comportamiento en sentido UL que en DL; lo que comprueba que los parámetros de contienda elegidos no son óptimos para este caso o que el mecanismo EDCA no es suficiente para lograr un manejo adecuado de la

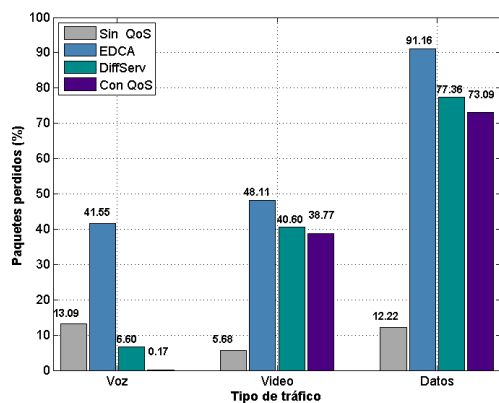
QoS. En cambio, DiffServ en cuestión de reparto de caudal y porcentaje de paquetes perdidos tiene un mejor funcionamiento; y se puede ver en la última columna que la unión de ambos, mejora la QoS global.



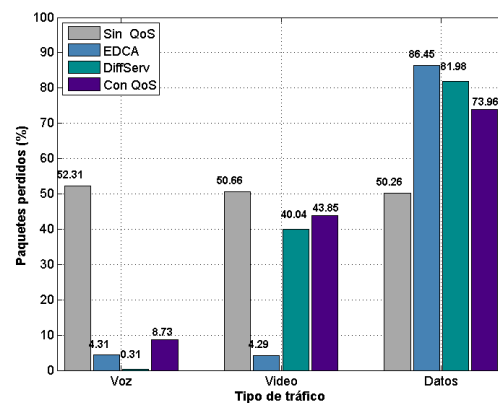
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink

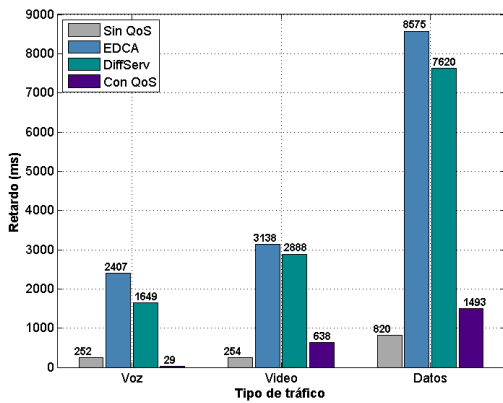


(d) STA2 - Sentido Uplink

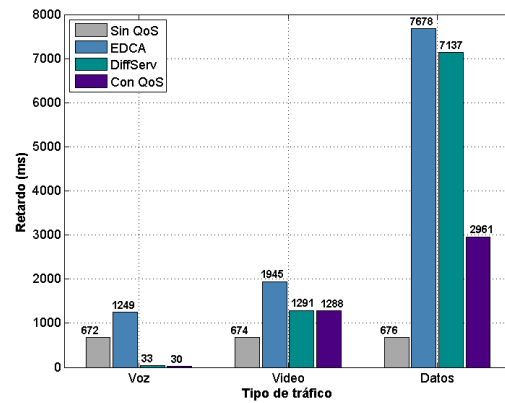
Figura 6.16: Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Prueba 2.1.b)

Respecto al retardo, en las Gráficas de 6.17, como se ha venido observando para la transmisión en sentido DL los valores de retardo son en general aceptables ya que apenas llegan a los 250 ms para voz, lo que de acuerdo a la ITU, permitiría una calidad media en una comunicación, y también es de notar que el valor de retardo mayor sigue siendo para el flujo de datos, a pesar de que se está inyectando la misma cantidad de información de vídeo y datos. En cuando al sentido UL, los retardos de casi 700 ms, son demasiado grandes para permitir el establecimiento de una llamada de voz en buenas condiciones. Se aprecia en el caso de EDCA y DiffServ, que los valores de retardo en ambos casos son bastante grandes y que la unión de ambos mecanismos, como propone la estrategia de integración aquí presentada, reduce los valores obtenidos, mejorando el comportamiento de este parámetro.

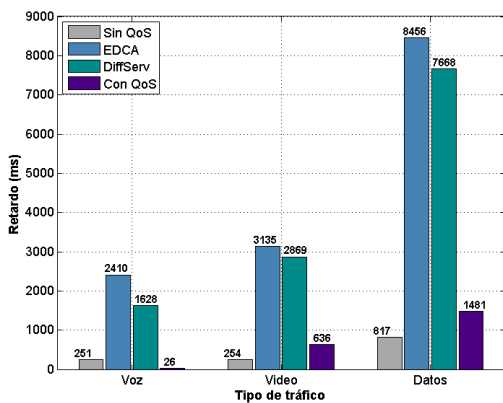
Con respecto al *jitter*, representado en la Figura 6.18, sus valores en general siguen permaneciendo muy pequeños en ambos sentidos y su comportamiento a lo largo de todos los



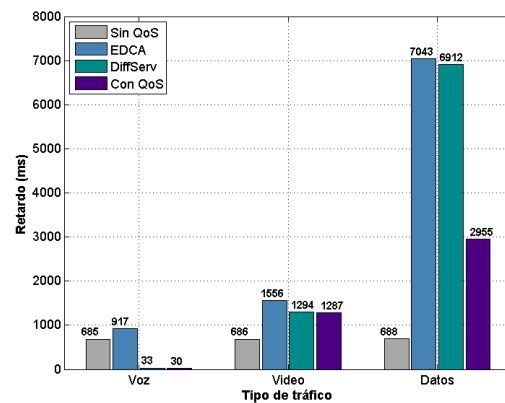
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink

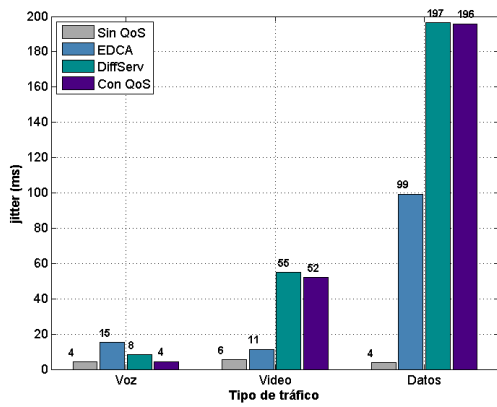


(d) STA2 - Sentido Uplink

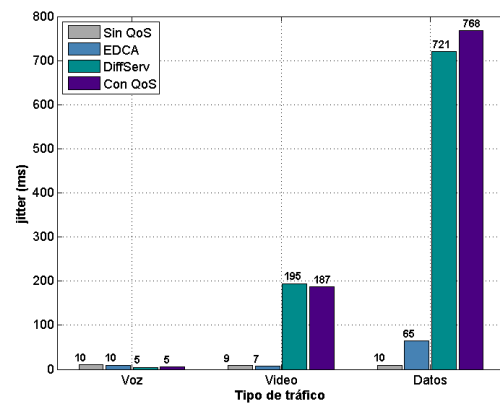
Figura 6.17: Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.1.b)

experimentos es muy similar al de retardo. Al igual que en el caso del retardo, la presencia de ambos mecanismos produce una mejora en los valores de este parámetro.

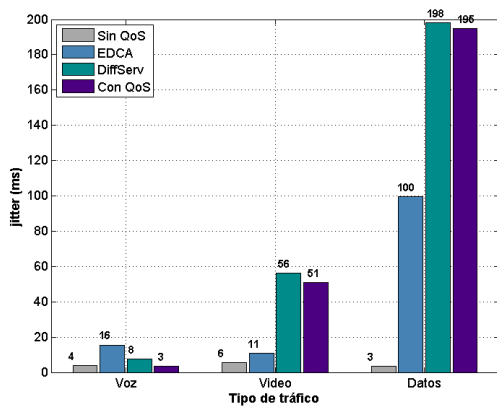
En general, la diferencia entre tener QoS y no tenerla, es que los diferentes tipos de tráfico reciben un tratamiento diferenciado en función de los mecanismos configurados en cada caso, de esta forma, se pueden garantizar ciertos requerimientos de QoS, como un caudal mínimo o un valor de retardo y *jitter* aceptables. También en esta prueba se observa que la presencia de los dos mecanismos (EDCA y DiffServ) juntos, optimizan la QoS de los flujos que circulan por la red, a diferencia de lo que se obtiene sin QoS y con ambos mecanismos por separado.



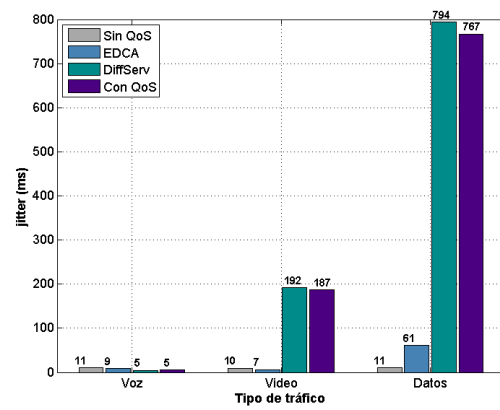
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink



(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.18: Análisis de *jitter* por tipo de tráfico. Prueba 2.1.b)

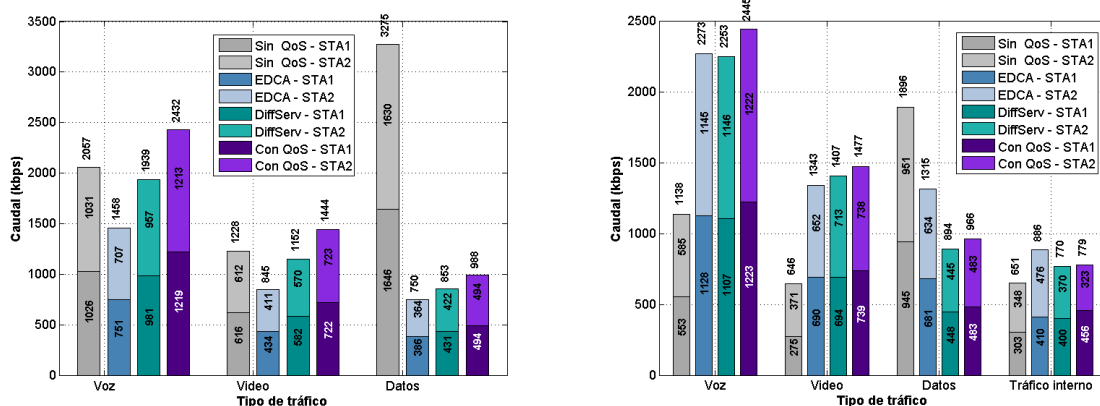
### 6.3.3. Escenario de pruebas N°2 con tráfico interno

En este apartado, se presentará el caso más completo de los considerados en este proyecto, en donde a partir de las pruebas del apartado anterior ahora se inyectará un tráfico al que hemos denominado *interno* que circula entre los nodos de la red WiFi, el cual como ya se mencionó será tratado como tráfico de datos (BE) con baja prioridad. La finalidad de realizar estas pruebas es que se observe como la presencia de este tipo de tráfico no interfiere con la provisión de QoS extremo a extremo, la cual se sigue manteniendo a pesar de la gran carga presente en la red WiFi.

#### 2.a) Transmisión de flujos Voz + Datos en saturación

Esta prueba es una repetición de los anteriores apartados en donde se han inyectado flujos de voz en saturación y datos en sobresaturación, con la diferencia de que ahora habrá un flujo de 1500 kbps circulando en cada sentido de la comunicación entre las dos STA's involucradas en este Escenario.

Como en los anteriores análisis, se presenta primero la Figura 6.19, cuyas gráficas de barras representan el promedio del reparto del caudal en todos los sentidos de la comunicación. Se puede observar que existe un reparto más equitativo en todos los flujos cuando hay QoS que cuando no la hay. Además, al proporcionar un ancho de banda reservado al tráfico interno, aunque éste sea tratado como de baja prioridad, se logra que éste se transmita por la red. Aunque exista una enorme cantidad de flujos de datos que necesitan ser transmitidos, cada uno de ellos se transmite por la red de acuerdo a su prioridad y reparto de ancho de banda sin interferir con los otros, preservando sus requerimientos de QoS. Además, es de notar el reparto proporcional que se consigue a partir de la implementación de DiffServ en al capa IP y con la correcta asignación de valores al parámetro  $TXOP_{limit}$ , en función de los nodos presentes en la red WiFi.



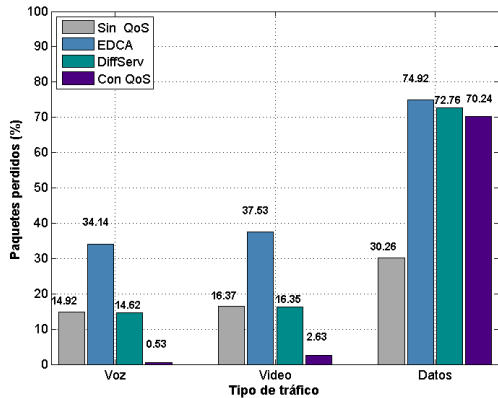
(a) Caudal por tipo de tráfico en sentido DL

(b) Caudal por tipo de tráfico en sentido UL

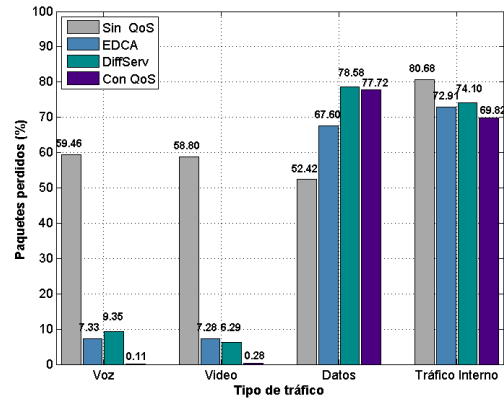
Figura 6.19: Análisis de caudal. Prueba 2.2.a)

En la Figura 6.20, la cantidad de paquetes perdidos en el sentido UL es considerablemente mayor que en DL, debido a que el reparto entre ambos sentidos no es simétrico en ausencia de QoS y su comportamiento se rige por muchos factores, entre ellos la cantidad de nodos en la

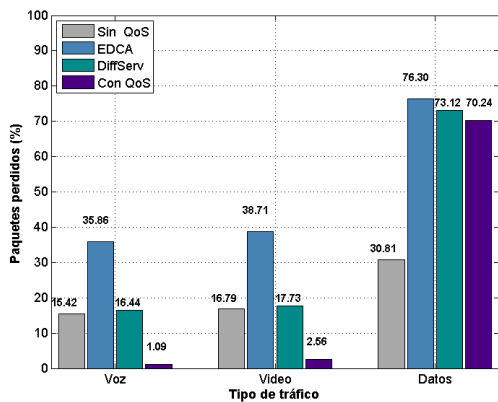
red y la cantidad de información que se tenga que transmitir. En cambio, cuando existe QoS el nivel de pérdidas se rige por las condiciones previamente establecidas por el administrador de la red, garantizando en la medida de lo posible que los requerimientos de QoS se conserven a lo largo de todo el recorrido. Así, podemos observar como en estas gráficas la proporción de paquetes perdidos entre los flujos de voz y vídeo es mucho menor que para los flujos de datos. Proporcionando a estos flujos un mejor tratamiento con respecto a cuando hay ausencia de QoS.



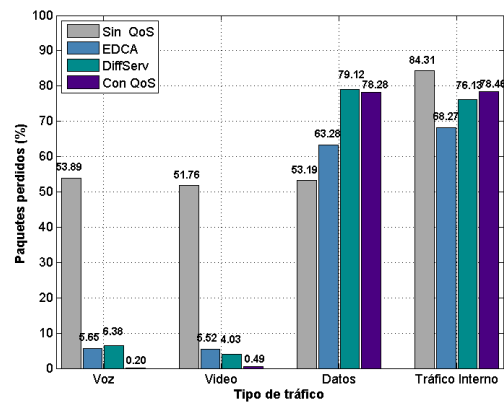
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink



(d) STA2 - Sentido Uplink

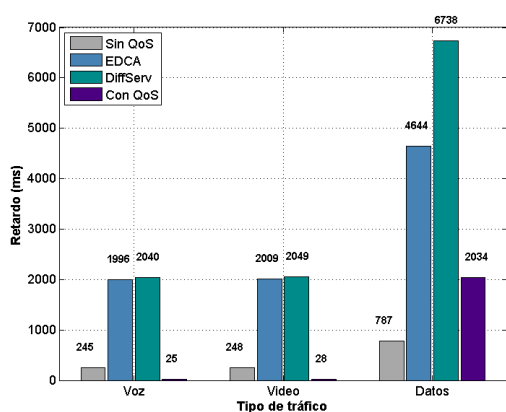
Figura 6.20: Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Prueba 2.2.a)

Además, se puede apreciar que ninguno de los dos mecanismo propuestos es capaz de proporcionar un óptimo tratamiento a la cantidad de paquetes perdidos por sí mismo, y que cuando se tienen ambos juntos, se logra reducir el porcentaje de paquetes perdidos mejorando la QoS.

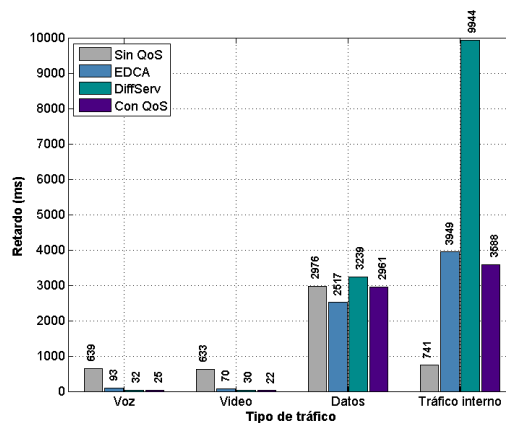
En las Figuras 6.21 y 6.22, se aprecia el comportamiento de los parámetros de retardo y *jitter* respectivamente. Nuevamente, es de notar que el *jitter* tiene valores muy bajos, excepto en el caso de los flujos menos prioritarios (datos y tráfico interno), que aumenta mucho cuando se tiene DiffServ y ambos mecanismos juntos; esto como ya se comentó anteriormente es debido al límite establecido en la cola asignada a estos flujos, pues a ninguno de los dos se le permite

transmitir más de los mínimo configurado para cada uno de ellos.

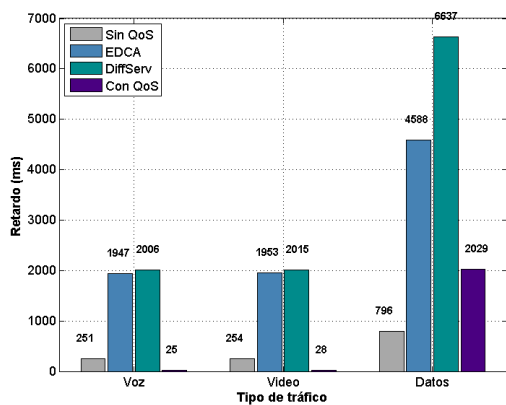
Finalmente, con respecto a los gráficos que corresponden al análisis del retardo, su comportamiento entre los diferentes tipos de flujos es muy similar a lo que hemos venido viendo, siendo muy igual y elevado en ausencia de QoS, y diferenciado en presencia de QoS. Es de notar, la reducción que se da cuando se tienen ambos mecanismos juntos. Además, se aprecia también que los flujos de tráfico interno se comportan de manera similar a los flujos de datos.



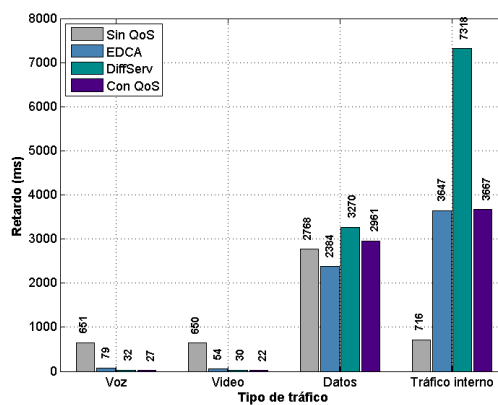
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



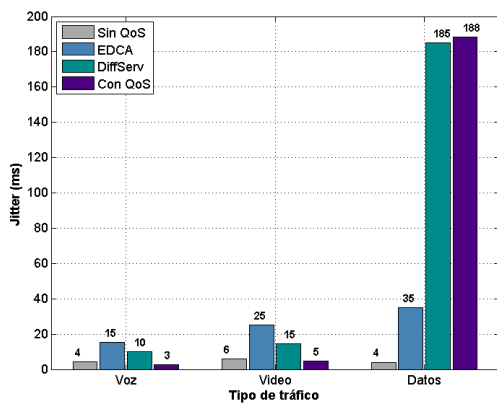
(c) STA2 - Sentido Downlink



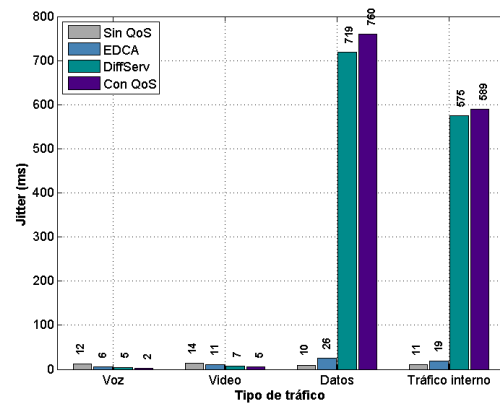
(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.21: Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.2.a)

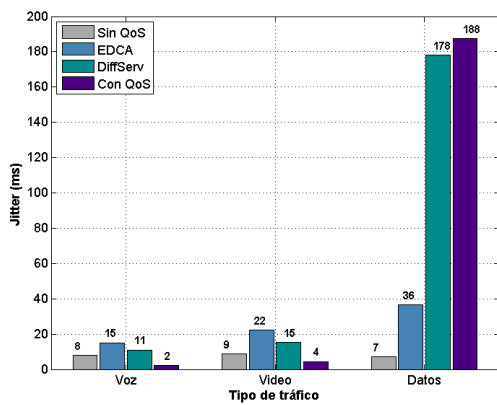




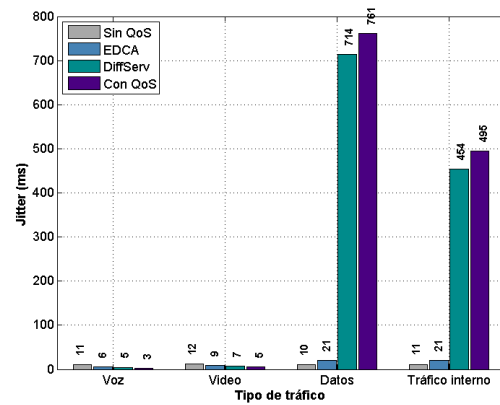
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink



(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.22: Análisis de jitter por tipo de tráfico. Prueba 2.2.a)

### 2.b) Transmisión de flujos Voz en saturación + Vídeo + Datos en sobresaturación

Finalmente, la última prueba realizada con la configuración inicial propuesta se presenta en este apartado, en el cual vamos a enviar los tres tipos de tráfico que se han venido mencionando y a la vez tráfico interno. En este caso concreto, se inyectarán a la red 25000 kbps, dividido entre las distintas categorías de tráfico, cabe recordar que el ancho de banda medido en la red WiFi fue de 12500 kbps, por lo cual se estarán inyectando a la red en promedio en doble de su capacidad, lo que nos permitirá poner a prueba bajo condiciones de enorme saturación en la red, una vez más a la estrategia de integración aquí presentada.

En este caso, comenzaremos comentando los inconvenientes que se tuvieron al realizar esta prueba, inicialmente se pretendía saturar a la red con 30 Mbps; sin embargo, cuando se comenzaron a realizar las pruebas sin calidad de servicio, se observó que era demasiada información la que se quería enviar y nos enfrentamos a problemas como flujos no enviados, retardos excesivos en las transmisiones y caída de las interfaces de los equipos WiFi, motivo por el cual se decidió enviar menos información; aún así con 25 Mbps se presentaron algunos inconvenientes como los mencionados, pero en este caso, se pudieron realizar las pruebas necesarias en base a varias repeticiones de las medidas correspondientes al escenario sin QoS. Un ejemplo, de este comportamiento se puede observar la Figura 6.23.

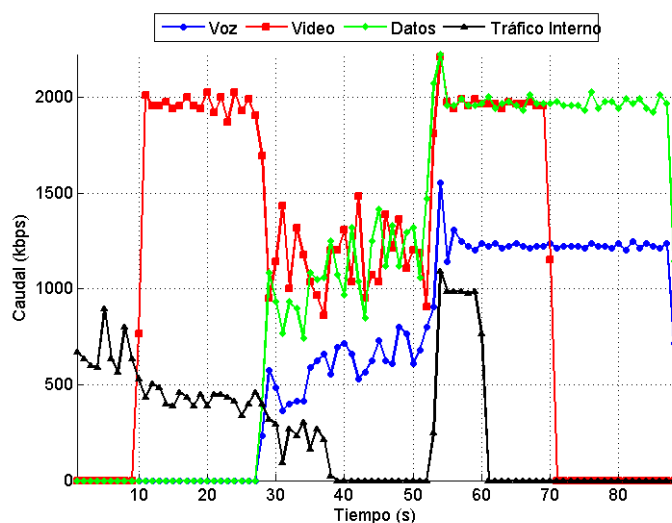


Figura 6.23: Gráfica Caudal/Tiempo. Ejemplo del comportamiento de los flujos sin QoS.

Este pequeño inconveniente presentado durante la realización de las pruebas, pone de manifiesto la necesidad de tener un control sobre los recursos disponibles en una red. Este tipo de control se logra mediante la correcta aplicación de estrategias que proporcionen QoS a los distintos tráficos que circularán por la red, priorizando de diversas formas complementarias unos sobre otros. Cabe mencionar que al aplicar el mecanismo propuesto de QoS, los problemas iniciales fueron resueltos, pudiendo realizar de forma continua todas las pruebas necesarias y comprobando la funcionalidad de este tipo de mecanismos.

La Figura 6.24 muestra el reparto entre en caudal de las distintas estaciones participantes en este Escenario. En primer lugar, se observa que como en todos los experimentos el flujo que tiene mayor cantidad de información para ser transmitida es el que gana un mayor ancho de banda a la hora de competir por el canal, mientras no haya QoS en la red; además, es evidente la asimetría que existe entre el sentido UL y DL.

En cambio, cuando se implementan los mecanismos propuestos se controla más el reparto de ancho de banda pues se garantiza cierto caudal a cada tipo de flujo en función de las necesidades de cada red, como en este caso se propuso en la Tabla 6.2. El buen funcionamiento del reparto de caudal entre las distintas clases de tráfico se puede observar en las barras con QoS.

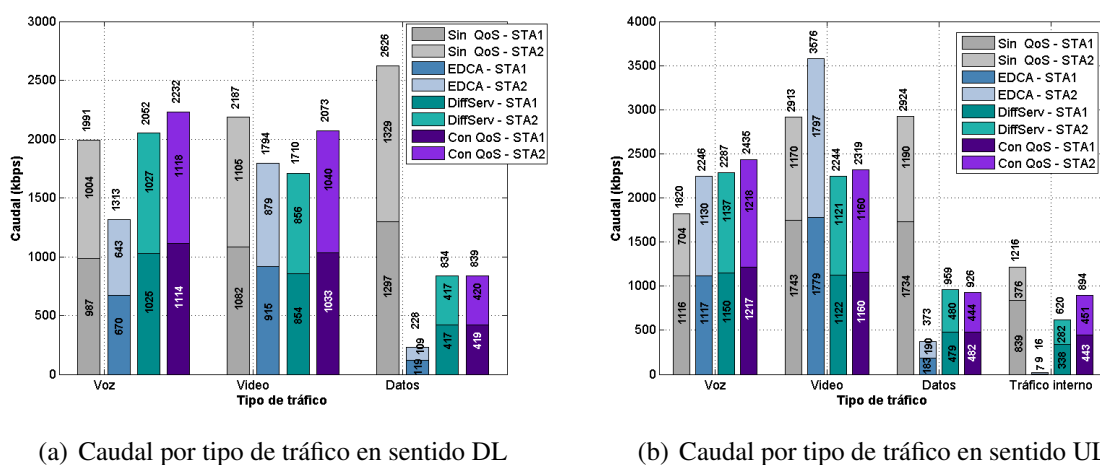
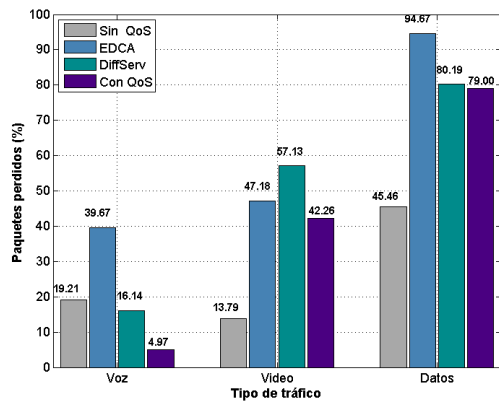


Figura 6.24: Análisis de caudal. Prueba 2.2.b)

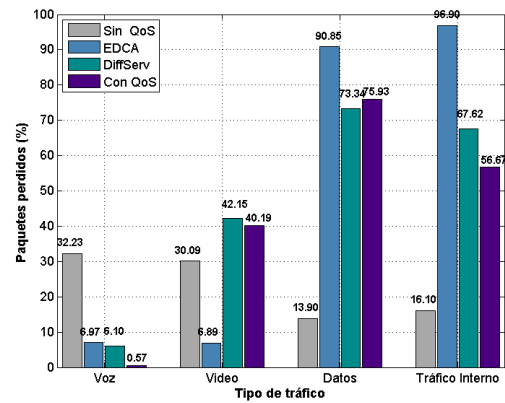
El porcentaje de información perdida en cada tipo de tráfico se puede observar en la Figura 6.25, la cual como ya se mencionó anteriormente es complementaria a las gráficas de caudal. Se puede observar una reducción importante en la cantidad de paquetes perdidos para los flujos de voz y vídeo, cuando hay presentes en los equipos mecanismos que proporcionen QoS.

En cuanto a las dos variables temporales, para medir la QoS, como en todas las pruebas anteriores se presentan las gráficas de retardo en la Figura 6.26 y *jitter* en la Figura 6.27, que nos proporcionan un complemento importante con el cual evaluar las prestaciones de QoS. En ambas figuras se puede observar el tratamiento diferenciado que tienen los paquetes de voz sobre los de vídeo y los de vídeo sobre los de datos y tráfico interno, en el escenario con QoS, y también se aprecia la diferencia que existe con respecto a la no implementación de QoS en el segmento WiFi.

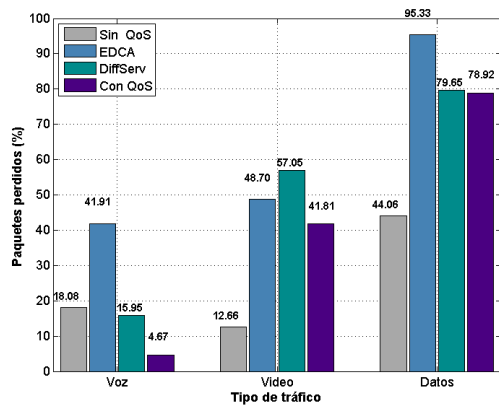
En esta prueba, se han incluido varios factores: la presencia de dos estaciones asociadas a la red WiFi, la inyección de flujos de todos los tipos incluido el tráfico interno. Se puede observar que, con la implementación ya sea de EDCA o DiffServ por separado se consigue la priorización de los flujos en función de los cuatro parámetros aquí medidos y que cuando se unen ambos, como se propone en la estrategia presentada en este proyecto, los resultados son aún mejores



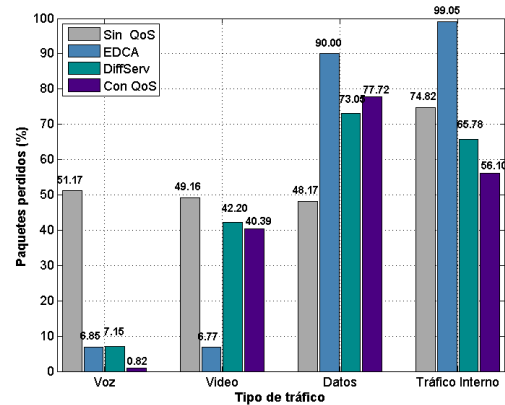
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



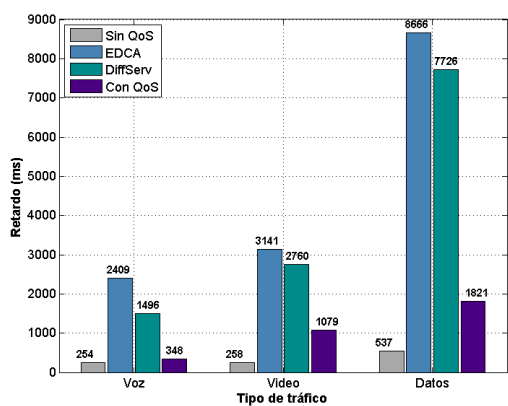
(c) STA2 - Sentido Downlink



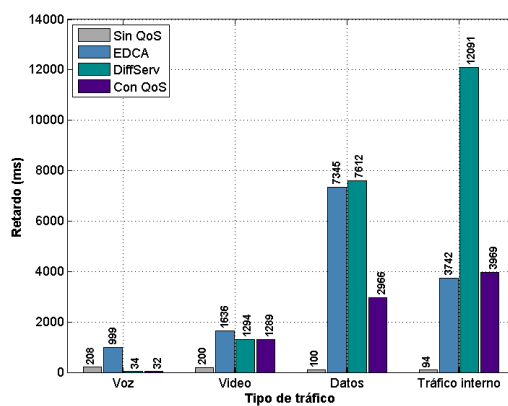
(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.25: Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Prueba 2.2.b)

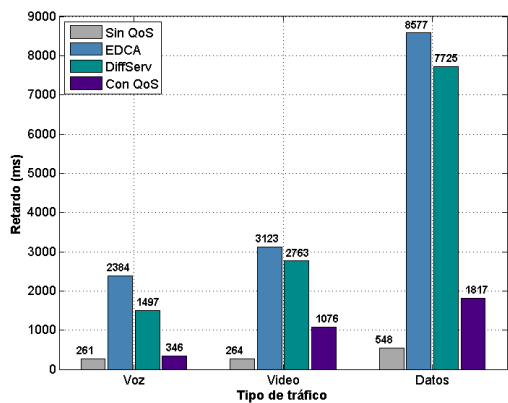
consiguiendo que los valores de los cuatro parámetros ajusten correctamente, en la mayoría de los casos; sin embargo, los resultados obtenidos no son óptimos, ya que en ocasiones los valores de retardo o *jitter* son elevados y/o el caudal se podría aprovechar de mejor manera. En estos casos, se deben optimizar los valores de los parámetros EDCA; probando diferentes combinaciones y observando su efecto en cada escenario. De igual forma, como se mencionó previamente, el reparto propuesto del ancho de banda disponible en DiffServ es solamente un ejemplo que nos permitió validar la estrategia de integración y analizar los resultados, pero ese reparto podría cambiar dependiendo de las necesidades de los usuarios y de los recursos en la red en una situación real.



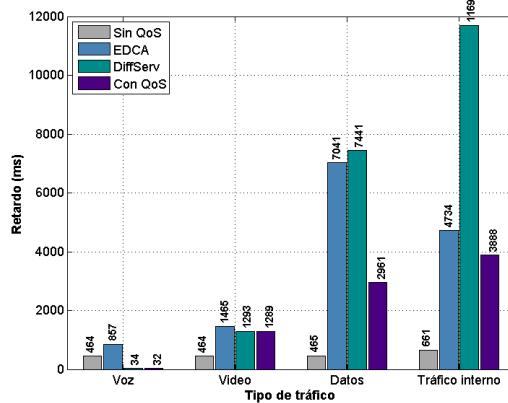
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink

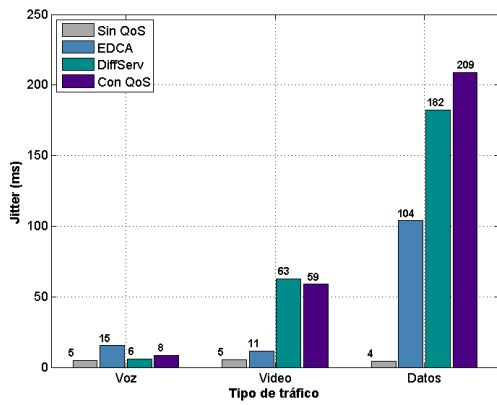


(c) STA2 - Sentido Downlink

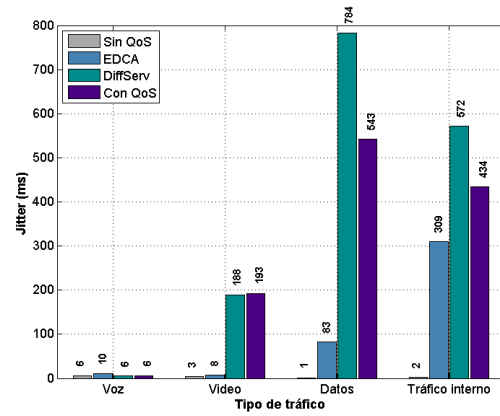


(d) STA2 - Sentido Uplink

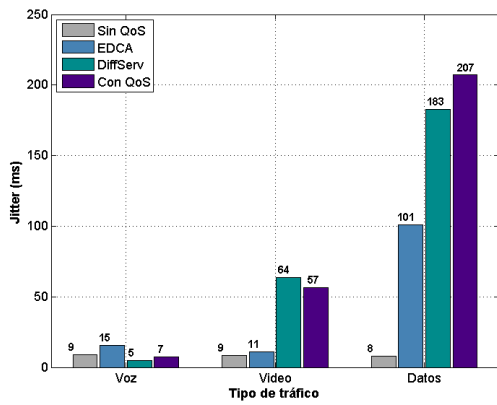
Figura 6.26: Análisis de retardo por tipo de tráfico. Prueba 2.2.b)



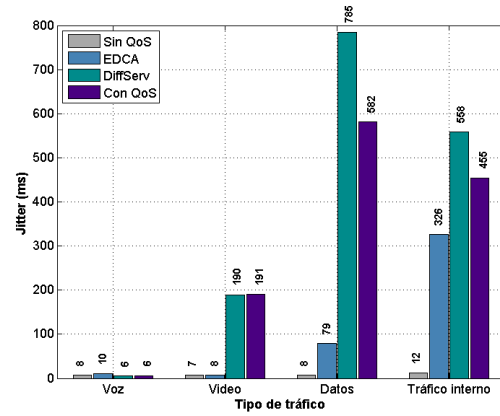
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink



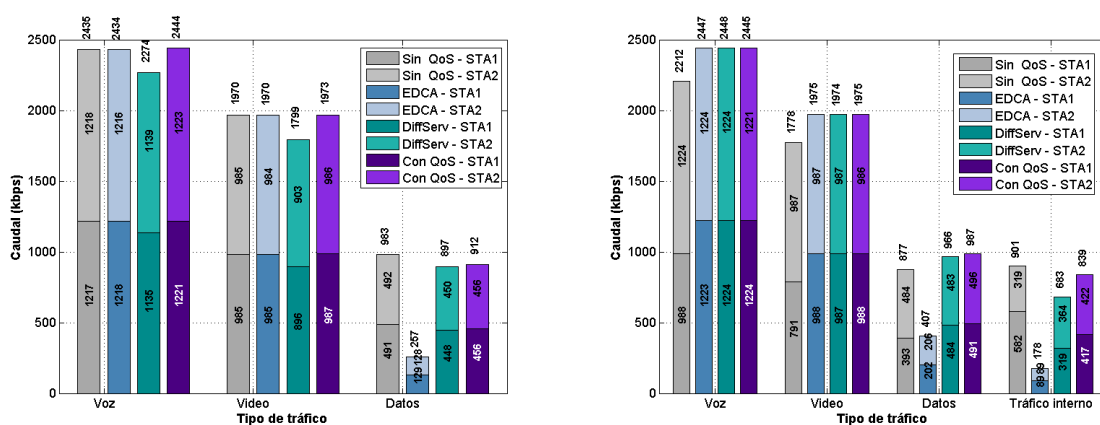
(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.27: Análisis de jitter por tipo de tráfico. Prueba 2.2.b)

### 6.3.4. Flujos al máximo establecido

Una vez que se han realizado la primera serie de pruebas para validar el funcionamiento de la estrategia de integración, es interesante analizar el caso en el cual todos los flujos están al máximo establecido en la Tabla 6.2, es decir, se inyectará un flujo de voz en cada sentido de la comunicación igual a 2500 kbps, lo que implica que cada ordenador inyectará 1250 kbps, los flujos de vídeo serán de 1000 kbps para cada ordenador lo que hará el total de 2000 kbps en cada sentido, en cuanto al flujo de datos este en este caso también se inyectará al máximo establecido 1000 kbps en cada sentido y finalmente con respecto a la transmisión de tráfico interno este será de 750 kbps por cada STA de la red WiFi, de tal forma que, el caudal total que se envíe será de 12500 kbps, que corresponde al ancho de banda total que medimos en un inicio en la red.

Las gráficas de la Figura 6.28, muestran el reparto entre el caudal entre las todas las estaciones presentes en la red, en ambos sentidos de la comunicación, como se puede observar en este caso la red no esta sobreesaturado motivo por el cual el reparto entre el caudal no difiere considerablemente entre el DL y UL para los flujos de voz y vídeo, y en el caso de los datos y el tráfico interno éste es más grande en el caso de que no exista QoS en la red WiFi. Se puede resaltar, que en el caso del escenario sin QoS se observa un reparto del caudal proporcional a la cantidad de tráfico que se esta inyectando de cada tipo de tráfico. En cuanto a los mecanismo de QoS, en los tres presentan un buen reparto del caudal, pero en este caso se nota la gran pérdida de paquetes que hay en los flujos de datos cuando esta presente sólo el mecanismo EDCA.



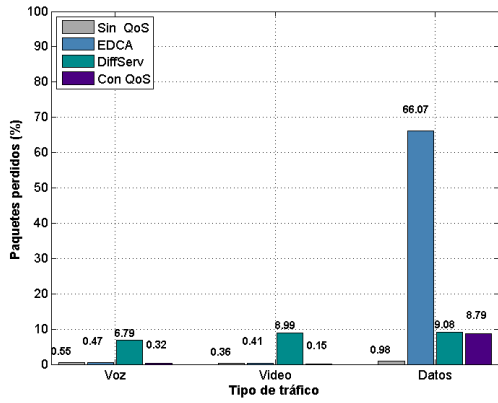
(a) Caudal por tipo de tráfico en sentido DL

(b) Caudal por tipo de tráfico en sentido UL

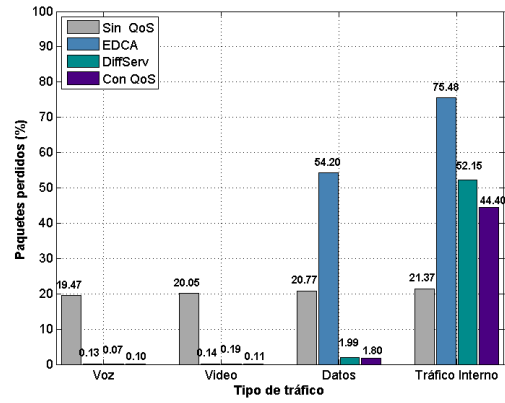
Figura 6.28: Análisis de caudal. Flujos al máximo establecido

Al inyectar información igual a los límites preestablecidos, se observa en general que las pérdidas son pequeñas, en el caso de EDCA al no tener configurados los parámetros correctos para este reparto de caudal, funciona priorizando flujos, pero no tiene un comportamiento óptimo, se puede apreciar que la segunda columna es la que más paquetes pierde en todos los casos.

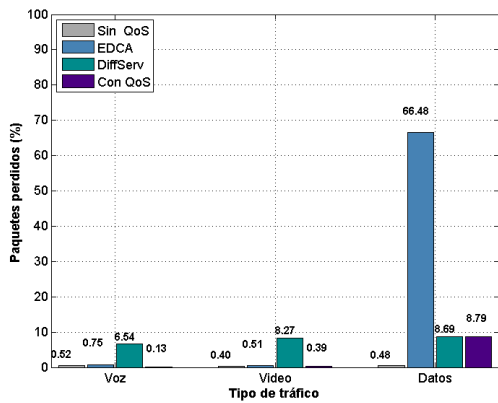
El comportamiento del retardo que se observa en la Figura 6.30, se aprecian en general valores pequeños; pero se sigue observando el efecto de la cola configurada en DiffServ que hace que el retardo del tráfico de datos aumente considerablemente al igual que en el caso del *jitter*. En la Figura 6.31 se aprecia que, como en casi todas las pruebas presentadas, el *jitter* se comporta



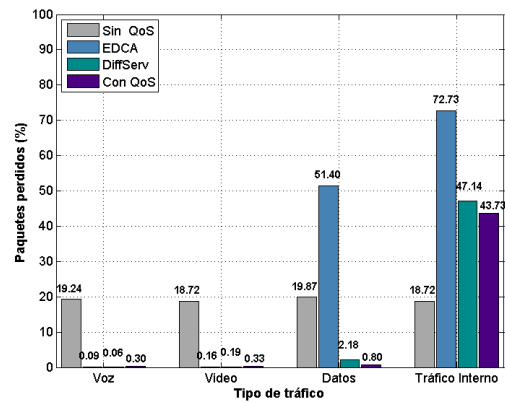
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



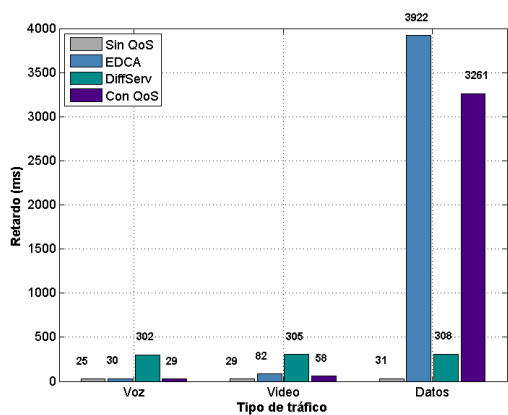
(c) STA2 - Sentido Downlink



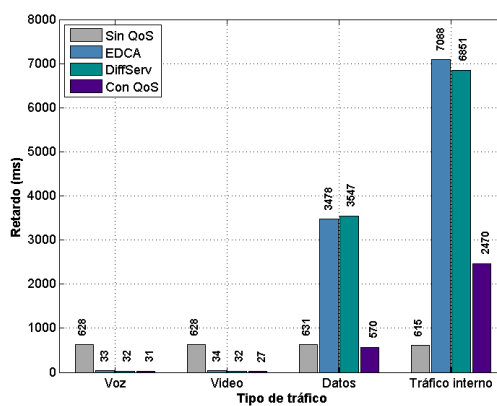
(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.29: Porcentaje de paquetes perdidos por tipo de tráfico. Flujos al máximo establecido de la misma manera que el retardo.

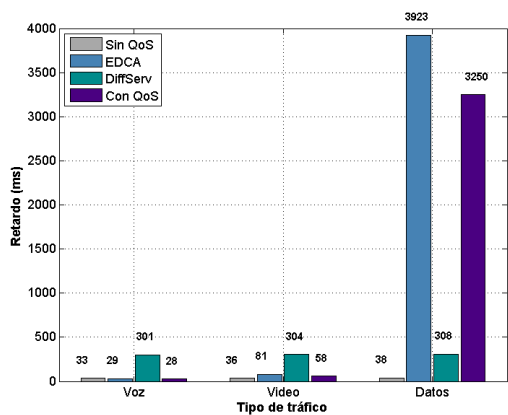




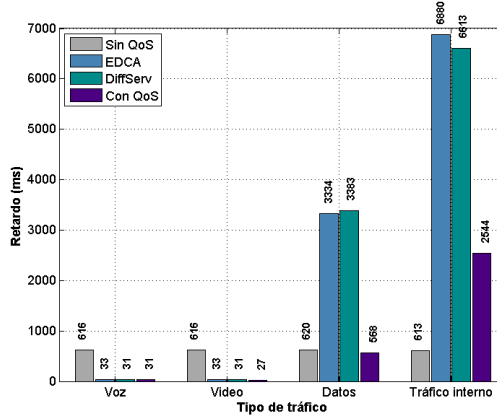
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink

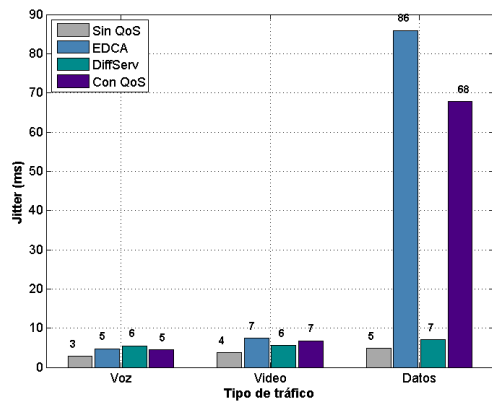


(c) STA2 - Sentido Downlink

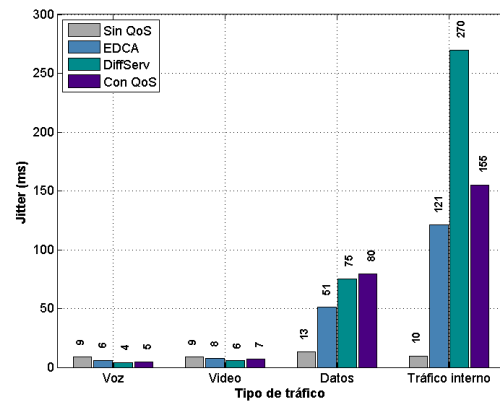


(d) STA2 - Sentido Uplink

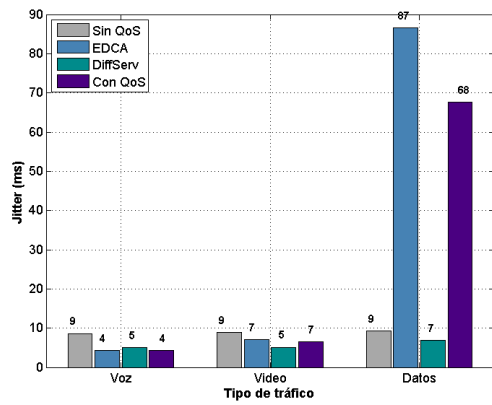
Figura 6.30: Análisis de retardo por tipo de tráfico. Flujos al máximo establecido



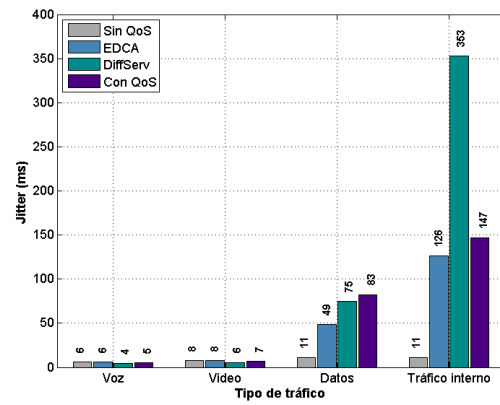
(a) STA1 - Sentido Downlink



(b) STA1 - Sentido Uplink



(c) STA2 - Sentido Downlink



(d) STA2 - Sentido Uplink

Figura 6.31: Análisis de jitter por tipo de tráfico. Flujos al máximo establecido

Después de haber realizado toda esta serie de pruebas para validar el comportamiento de la estrategia de integración propuesta en este PFM, se puede decir que, ésta funciona correctamente, ya que la unión de ambos mecanismos mejora las medidas de QoS que se analizaron en cada caso.

Se observó, que hay algunas situaciones como en el caso de las pruebas 1.1.a) y 2.1.a), en donde el mecanismo DiffServ o EDCA por si sólo podrían garantizar unas buenas prestaciones de QoS a los flujos que circulan por red; en cambio, en otros escenario como el 2.2.b), en donde la carga en la red es mayor o hay presencia de más tipos de tráfico que pueden sobresaturar a la red en algún momento, no es suficiente con un sólo mecanismo, se requiere el manejo del ancho de banda y la priorización que proporciona el mecanismo DiffServ sumado al tratamiento diferenciado que otorga EDCA, en el acceso al canal inalámbrico, para obtener mejores prestaciones.



**Parte IV**  
**CONCLUSIONES**



# Capítulo 7

## Conclusiones y Trabajo Futuro

Este Proyecto de Fin de Máster ha sido fruto del trabajo realizado dentro del proyecto Open Reach en su segunda fase. En el desarrollo de este PFM ha habido una importante fase de toma de conocimientos, donde se investigó en profundidad la forma en que los estándares 802.16 (WiMAX-Fijo) y 802.11e-EDCA (WiFi-EDCA) proporcionan calidad de servicio, así como los principales mecanismos de provisión de QoS en la capa IP. Se ha realizado también una búsqueda bibliográfica sobre el tema de integración de las tecnologías IEEE 802.16 e IEEE 802.11e, que aportó algunas ideas interesantes y varias consideraciones que se tomaron en cuenta a la hora de realizar la propuesta.

A través de los diferentes capítulos de este documento, se ha descrito la principal aportación de este PFM que es el diseño de una estrategia de integración para equipos 802.11e-EDCA (WiFi) y 802.16 (WiMAX) con soporte para QoS. Esta estrategia se basa en el mapeo de tráfico entre todas las tecnologías involucradas, integrando las características de ambos estándares y complementándolos con un modelo de servicios diferenciados en la capa IP.

En una primera etapa de proyecto se identificaron las principales consideraciones que se tomaron en cuenta para realizar la propuesta, entre ellas se pueden mencionar: un bajo nivel de integración en la implementación, uso de bandas no licenciadas e independencia de la capa física con la que se trabaje, para dotar de mayor flexibilidad a la propuesta.

A modo de resumen, las principales funciones que implementa la estrategia de integración aquí presentada son las siguientes:

- Propuesta de mapeado de los diferentes tipos de tráfico entre cada una de las tecnologías involucradas (WiMAX, WiFi y DiffServ)
- Aprovisionamiento de los flujos de servicio WiMAX, configurando un filtro adecuado para cada tipo de tráfico.
- Creación de un modelo de Servicios Diferenciados (DiffServ) en la capa IP de los equipos WiFi, mediante la herramienta *Traffic Control* de Linux.
- Asignación de valores adecuados a los parámetros de contienda EDCA de los equipos WiFi (CWmin, AIFSN y TXOPlimit), mediante la herramienta *iwpriv* del *driver* Mad-WiFi.

Cabe mencionar la complejidad que representa encontrar una regla que permita mapear los requerimientos de retardo y *jitter* que establece el estándar WiMAX del lado WiFi; sin embargo, dentro de lo posible se pueden lograr unas prestaciones adecuadas mediante una asignación correcta de valores a los parámetros de contienda del mecanismo EDCA.

Una vez descrita la propuesta de integración, se procedió a la validación de la misma a través de pruebas en laboratorio con equipos comerciales disponibles en la universidad. Este proceso permitió analizar el funcionamiento y comportamiento de la estrategia a través del despliegue de diferentes escenarios de interés. Para la realización de las pruebas fue necesario el ajuste y control de la mayor cantidad de parámetros posible, con la finalidad de disminuir la variabilidad en los resultados.

Los resultados obtenidos en el proceso de validación muestran el impacto que tiene cada uno de los mecanismos propuestos por separado y en su conjunto. Del mecanismo EDCA podemos destacar que unos valores adecuados de los parámetros de contienda darán lugar a un retardo y *jitter* adecuados, permitiéndonos priorizar los diferentes tipos de tráfico en función de sus requerimientos. Este mecanismo se complementa con el modelo DiffServ, que nos proporciona una gestión adecuada del caudal disponible en la red mediante las disciplinas de colas con clases, de lo cual carece EDCA.

El análisis de los resultados ha demostrado como la estrategia de integración propuesta permite que los parámetros de QoS sean mapeados entre las diferentes tecnologías, permitiendo que se mantengan los requerimientos de QoS establecidos inicialmente, optimizando en la medida de lo posible los recursos disponibles.

El desarrollo del presente PFM ha abierto el camino hacia diferentes líneas de investigación que podrían ampliar o continuar la estrategia de integración aquí descrita, las cuales se enlistan a continuación:

- Automatizar la configuración del bloque WiFi, en función de los flujos aprovisionados en el bloque WiMAX.
- El desarrollo de un módulo de control de admisión, capaz gestionar las peticiones de transmisión y recepción de ambos estándares en función de la disponibilidad que tengan ambas redes. Lo cual en WiFi se podría desarrollar mediante el uso de la trama TSPEC (Traffic SPECification).
- La implementación de un módulo para medir de forma automática el ancho de banda disponible en la red WiFi, podría ser en función del número de colisiones, por medio de las cuales se puede el nivel de saturación de la red o bien mediante un sondeo en determinados intervalos de tiempo dentro de la misma red.

Finalmente, cabe mencionar que los objetivos de esta investigación se han cumplido, ya que se ha presentado una estrategia de integración que posee ciertas ventajas en cuanto a la provisión de servicios de banda ancha en zonas rurales, pues permite extender la cobertura de las redes WiMAX mediante WiFi, lo que podría disminuir el número de estaciones base WiMAX necesarias para conectar estas zonas y a la vez el coste de despliegue de las mismas. Además, se



logra combinar las mejores características de las redes WiMAX (QoS parametrizada, distancias de decenas de kilómetros en áreas semiurbanas y rurales) con las de los equipos WiFi (bajo coste, flexibilidad, bajo consumo) funcionando en la banda libre de los 5GHz.

Con base en la investigación previa realizada y en los resultados obtenidos se puede decir que la estrategia propuesta en este PFM es una aportación interesante en el desarrollo de equipos inalámbricos para zonas rurales, pues hasta la fecha sólo se han encontrado resultados de simulaciones y/o implementaciones con un alto nivel de complejidad, que no son viables dentro del contexto que se aborda en este proyecto.



**Parte V**  
**APÉNDICES**



# Apéndice A

## Script de Configuración de Equipos WiFi

```
#!/bin/bash

## Este script automatiza los cambios que se deben aplicar al AP y STA.
  Se debe ejecutar desde el AP

#Establecemos el PATH para poder ejecutar los comandos sin necesidad
de introducir toda la ruta de cada comando
PATH=/usr/local/sbin:/usr/local/bin:/usr/sbin:/usr/bin:/sbin:/bin

#Parámetros EDCA
cwmin_vo=3
cwmin_vi=7
cwmin_bk=15
cwmax_vo=7
cwmax_vi=15
cwmax_bk=15
aifs_vo=2
aifs_vi=2
aifs_bk=3
txoplimit_ap=128
txoplimit_sta=64

# Activación de EDCA en el AP y las estaciones

iwpriv ath0 wmm 1
ssh root@10.0.1.11 "/usr/local/sbin/remountrw; /sbin/iwpriv ath0 wmm 1"
ssh root@10.0.1.12 "/usr/local/sbin/remountrw; /sbin/iwpriv ath0 wmm 1"

echo "Configurando los parámetros de contienda EDCA en el AP..."

# # AC_BK en el AP
iwpriv ath0 cwmin 1 0 $cwmin_bk
iwpriv ath0 cwmax 1 0 $cwmax_bk
iwpriv ath0 txoplimit 1 0 $txoplimit_ap
iwpriv ath0 aifs 1 0 $aifs_bk
# AC_BK en las STA
iwpriv ath0 cwmin 1 1 $cwmin_bk
iwpriv ath0 cwmax 1 1 $cwmax_bk
iwpriv ath0 txoplimit 1 1 $txoplimit_sta
iwpriv ath0 aifs 1 1 $aifs_bk

# AC_VI en el AP
iwpriv ath0 cwmin 2 0 $cwmin_vi
iwpriv ath0 cwmax 2 0 $cwmax_vi
iwpriv ath0 txoplimit 2 0 $txoplimit_ap
iwpriv ath0 aifs 2 0 $aifs_vi
# AC_VI en las STA
iwpriv ath0 cwmin 2 1 $cwmin_vi
iwpriv ath0 cwmax 2 1 $cwmax_vi
iwpriv ath0 txoplimit 2 1 $txoplimit_sta
```

```

iwpriv ath0 aifs 2 1 $aifs_vi

# AC_VO en el AP
iwpriv ath0 cwmin 3 0 $cwmin_vo
iwpriv ath0 cwmax 3 0 $cwmax_vo
iwpriv ath0 txoplimit 3 0 $txoplimit_ap
iwpriv ath0 aifs 3 0 $aifs_vo
# AC_VI en las STA
iwpriv ath0 cwmin 3 1 $cwmin_vo
iwpriv ath0 cwmax 3 1 $cwmax_vo
iwpriv ath0 txoplimit 3 1 $txoplimit_sta
iwpriv ath0 aifs 3 1 $aifs_vo

echo "Los parámetros configurados son:"
wlanconfig ath0 list wme

echo "Configurando las colas IP en el AP..."

## Configuración DiffServ para el enlace DOWNLINK:
##
##[PC]-----[BS] )). . . (( [CPE]-----[AP] )). .([PC1]
##  eth0          eth0 weth0   weth0 eth0          eth0 ath0   wlan0
##
## El dimensionamiento de ancho de banda del presente script está hecho suponiendo que se dispone
## de una capacidad de 12.5Mbps del canal inalámbrico y, además, en todo momento.
## En cuanto a qué porción de ancho de banda total que se asigna a cada tipo
## de tráfico, este script utiliza una configuración de valores exclusivamente
## experimental. En realidad, estos valores dependen de la demanda que exista
## de los servicios por los usuarios que haya en la red en un caso concreto. Un
## servicio prioritario no necesariamente debe ocupar la mayor porción de ancho de banda.

## Eliminar la configuración anterior
tc qdisc del dev ath0 root 2> /dev/null
tc qdisc del dev eth0 ingress 2> /dev/null

#####
##          Ingress qdisc          ##
#####

## Una cola ingress para que los paquetes de alta prioridad (VoIP) sean enviados a la
## cola de salida cuanto antes, donde serán procesados por la egress qdisc. La configuración
## del parámetro burst es realizado de acuerdo con la fuente http://opalsoft.net/qos/DS-26.htm
tc qdisc add dev eth0 handle ffff: ingress
tc filter add dev eth0 parent ffff: protocol ip prio 1 u32 match ip tos 0xb8 0xff flowid :1 \
police rate 4900kbit burst 50kb drop

#####
##          Egress qdisc          ##
#####

tc qdisc add dev ath0 root handle 1: htb default 10

## Clase raiz ("bit" = bps, "bps" = Bps)
tc class add dev ath0 parent 1: classid 1:1 htb rate 6250kbit ceil 6250kbit

## DiffServ      WiMax      WiFi

## Trafico QoS
tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:12 htb rate 4500kbit ceil 5500kbit burst 17kb

## EF - UGS - AC_VO
tc class add dev ath0 parent 1:12 classid 1:121 htb rate 2500kbit ceil 4900kbit burst 17kb prio 0
tc qdisc add dev ath0 parent 1:121 handle 121: sfq perturb 10
tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 1 u32 match ip tos 0xb8 0xff flowid 1:121

## AF4x(1) - rtPS - AC_VI
tc class add dev ath0 parent 1:12 classid 1:120 htb rate 2000kbit ceil 2400kbit burst 17kb prio 1

```

```

tc qdisc add dev ath0 parent 1:120 handle 120: sfq perturb 10
tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 2 u32 match ip tos 0xa0 0xff flowid 1:120

## AF2x(1) - nrtPS - AC_BK
#tc class add dev ath0 parent 1:12 classid 1:120 htb rate 1500kbit ceil 1800kbit burst 34kb prio 2
#tc qdisc add dev ath0 parent 1:120 handle 120: sfq perturb 10
#tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 3 u32 match ip tos 0x20 0xff flowid 1:120

## Trafico Best Effort

## BE - BE - AC_BE
tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:11 htb rate 1000kbit ceil 1000kbit burst 17kb prio 2
tc qdisc add dev ath0 parent 1:11 handle 110: sfq perturb 10
tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 3 u32 match ip tos 0x20 0xff flowid 1:11

# El resto de trafico: interno (12% de 1500kbit)
tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:10 htb rate 750kbit ceil 750kbit burst 17kb prio 3
tc qdisc add dev ath0 parent 1:10 handle 10: sfq perturb 10
tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 4 u32 match ip tos 0x08 0xff flowid 1:10
## Otra opción para el tráfico interno consiste en filtrar según las direcciones IP origen/destino:
## tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 5 u32 \
## match ip src 10.0.3.0/24 match ip dst 10.0.3.0/24 flowid 1:11

echo "La configuracion realizada es:"
tc -s -d qdisc show dev ath0
tc -s -d class show dev ath0
tc -s -d filter show dev ath0

## Configuración de control de admisión para el enlace UPLINK:
##
##[PC]-----[BS] )). . . . (( [CPE]-----[AP] )). .(( [PC1]
## eth0 eth0 weth0 weth0 eth0 eth0 ath0 wlan0
##
## Eliminar la configuración anterior
tc qdisc del dev ath0 ingress 2> /dev/null

#####
## Ingress qdisc ##
#####

tc qdisc add dev ath0 handle ffff: ingress
## AC_VO
tc filter add dev ath0 parent ffff: protocol ip prio 1 u32 match ip tos 0xb8 0xff flowid :1 \
police rate 4900kbit burst 17kb drop
## AC_VI
tc filter add dev ath0 parent ffff: protocol ip prio 2 u32 match ip tos 0xa0 0xff flowid :2 \
police rate 2400kbit burst 17kb drop
## AC_BK
#tc filter add dev ath0 parent ffff: protocol ip prio 3 u32 match ip tos 0x20 0xff flowid :3 \
#police rate 1800kbit burst 17kb drop
## AC_BE
tc filter add dev ath0 parent ffff: protocol ip prio 3 u32 match ip tos 0x20 0xff flowid :3 \
police rate 1000kbit burst 17kb drop

echo "Configurando las colas IP en la STA1"

ssh root@10.0.1.11 "/usr/local/sbin/remountrw;
/sbin/tc qdisc del dev ath0 root 2> /dev/null;
/sbin/tc qdisc del dev eth0 ingress 2> /dev/null;
/sbin/tc qdisc add dev eth0 handle ffff: ingress;
/sbin/tc filter add dev eth0 parent ffff: protocol ip prio 1 u32 match ip tos 0xb8 0xff flowid :1
police rate 4900kbit burst 50kb drop;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 root handle 1: htb default 10;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1: classid 1:1 htb rate 3125kbit ceil 3125kbit;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:12 htb rate 2750kbit ceil 2750kbit burst 17kb;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:12 classid 1:121 htb rate 1250kbit ceil 2450kbit burst 17kb prio 0;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:121 handle 121: sfq perturb 10;

```

```
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 1 u32 match ip tos 0xb8 0xff flowid 1:121;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:12 classid 1:120 htb rate 1000kbit ceil 1200kbit burst 17kb prio 1;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:120 handle 120: sfq perturb 10;
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 2 u32 match ip tos 0xa0 0xff flowid 1:120;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:11 htb rate 500kbit ceil 500kbit burst 17kb prio 2;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:11 handle 110: sfq perturb 10;
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 3 u32 match ip tos 0x20 0xff flowid 1:11;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:10 htb rate 375kbit ceil 375kbit burst 17kb prio 3;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:10 handle 10: sfq perturb 10;
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 4 u32 match ip tos 0x08 0xff flowid 1:10;
tc -s -d qdisc show dev ath0; tc -s -d class show dev ath0;
tc -s -d filter show dev ath0; wlanconfig ath0 list wme"
```

```
echo "Configurando las colas IP en la STA2"
```

```
ssh root@10.0.1.12 "/usr/local/sbin/remountrw;
/sbin/tc qdisc del dev ath0 root 2> /dev/null;
/sbin/tc qdisc del dev eth0 ingress 2> /dev/null;
/sbin/tc qdisc add dev eth0 handle ffff: ingress;
/sbin/tc filter add dev eth0 parent ffff: protocol ip prio 1 u32 match ip tos 0xb8 0xff flowid :1
  police rate 4900kbit burst 50kb drop;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 root handle 1: htb default 10;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1: classid 1:1 htb rate 3125kbit ceil 3125kbit;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:12 htb rate 2750kbit ceil 2750kbit burst 17kb;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:12 classid 1:121 htb rate 1250kbit ceil 2450kbit burst 17kb prio 0;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:121 handle 121: sfq perturb 10;
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 1 u32 match ip tos 0xb8 0xff flowid 1:121;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:12 classid 1:120 htb rate 1000kbit ceil 1200kbit burst 17kb prio 1;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:120 handle 120: sfq perturb 10;
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 2 u32 match ip tos 0xa0 0xff flowid 1:120;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:11 htb rate 500kbit ceil 500kbit burst 17kb prio 2;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:11 handle 110: sfq perturb 10;
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 3 u32 match ip tos 0x20 0xff flowid 1:11;
/sbin/tc class add dev ath0 parent 1:1 classid 1:10 htb rate 375kbit ceil 375kbit burst 17kb prio 3;
/sbin/tc qdisc add dev ath0 parent 1:10 handle 10: sfq perturb 10;
/sbin/tc filter add dev ath0 parent 1:0 protocol ip prio 4 u32 match ip tos 0x08 0xff flowid 1:10;
tc -s -d qdisc show dev ath0; tc -s -d class show dev ath0;
tc -s -d filter show dev ath0; wlanconfig ath0 list wme"
```

```
echo "Configuración Finalizada"
```



## Apéndice B

### Especificaciones de los equipos

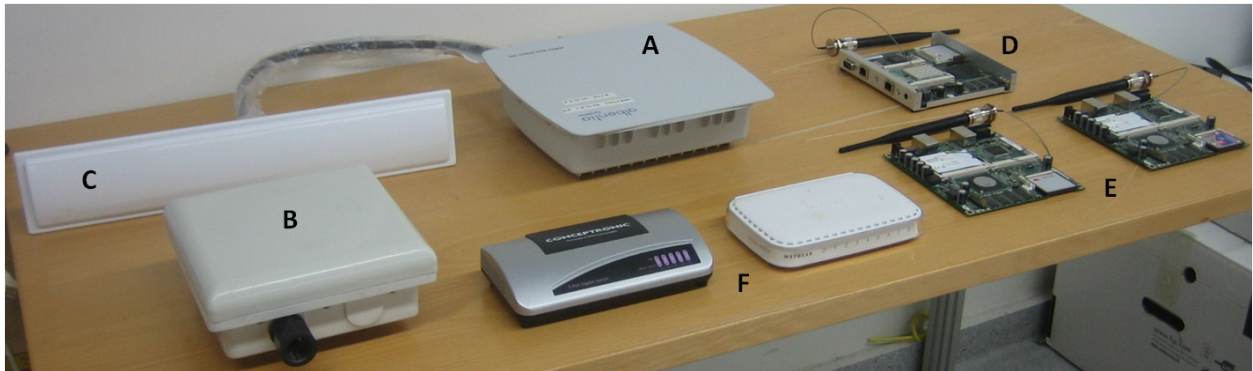


Figura B.1: Fotografía de los equipos utilizados durante las pruebas de validación

A Estación Base WiMAX (BS).

B Estación Suscriptora WiMAX (SS).

C Antena sectorial.

D Punto de acceso WiFi (Placa Alix, antena omnidireccional y compact flash).

E Estaciones cliente WiFi (Placas Wrap, antenas omnidireccionales y compact's flash).

F Hubs y switch.



## ARBA-550: WiMAX Base Station Series

*License-exempt 5 GHz ETSI and FCC bands*



---

### Product Overview

Alentia Systems proudly introduces the ARBA-550 series, the first truly WiMAX interoperable Base Station system operating in the 5 GHz license-exempt ETSI/FCC bands.

The ARBA-550 series belongs to the high performing and well proven ARBA-500 family of single-sector and multiple-sector WiMAX Base Stations

These Base Stations comply with the IEEE 802.16-2009 standard and provide the highest net throughput in the industry thanks to the high data-rate OFDM physical layer and the outstanding efficiency of the MAC layer.

ARBA-550 is based on a robust hardware platform with best-in-class performance radio which allows unprecedented coverage in the worst scenarios.

The highly scalable architecture of these Base Stations has been optimized to maximize the functionality, offering extensive QoS control on multiple differentiated services and users, total control on the network parameters, ARQ, data encryption and advanced management interfaces.

ARBA-550 has shown interoperability with many low-cost CPEs manufactured by multiple vendors, enabling CAPEX optimization based on the customer's particular



Thanks to the use of wider channel bandwidths of up to 10 MHz, this solution is able to provide an outstanding throughput-coverage performance comparable to expensive licensed band high power base stations, and far beyond proprietary systems operating in license-exempt bands.

ARBA-550 is an easy to install and low power consumption solution perfectly suited for rural WiMAX deployments, supporting solar-based power supply.

System integration, user and service provisioning is supported by a powerful and intuitive management system based on SNMP, web, command line interface and an innovative XML-RPC open protocol for remote management.

### System Description

The ARBA-550 Base Stations are easily scalable into multiple-sector configurations, and provide access connectivity to a wide range of Subscriber Stations from residential low-cost CPEs to professional/industrial terminals.

A single-sector ARBA-550 base station comprises an outdoor radio unit connected to an indoor power supply injector via a standard cat5 Ethernet cable which carries data and power. The outdoor unit houses all baseband and radio electronics in a compact and robust weather-proof IP67 enclosure.

Multiple-sector Base Stations can be configured by connecting several outdoor units to a single rack-mount indoor unit which synchronizes all sectors in order to cancel TDD inter-sector interferences.

This family of Base Stations implement the most advanced functionality of the IEEE 802.16-2009 standard, like ARQ, support to all QoS classes, multiple convergence sublayers and unlimited differentiated service flows per user to allow triple-play applications.



alentia systems s.a. - C/ Margarita Salas, 22 - Parque Tecnológico Leganés  
28918 Madrid (SPAIN) Tel: +34 91 440 0565 - Fax: +34 91 440 0569 - www.alentia.com

### PRODUCT HIGHLIGHTS

- Industry's first interoperable WiMAX Base Station in the 5 GHz band
- IEEE802.16-2009 (WiMAX) standard compliance
- Single/multiple-sector configurations
- Best-in-class net spectral efficiency of 3.5bps/Hz
- Full QoS support: BE, RTPS, nRTPS and UGS
- ARQ (Automatic Repeat Request)
- Available in ETSI 5470-5725 MHz and FCC 5725-5825 MHz bands
- Advanced networking functionality: Bridging, routing, VLAN, NAT
- SNMP, web, CLI and XML management
- Outdoor easy installation
- Low power consumption

Figura B.2: Especificaciones equipos WiMAX - 1

## System Specifications

Radio parameters			
Frequency Band	5470-5725 MHz (ETSI) or 5725-5825 MHz (FCC). See ordering options.		
Modulation	OFDM IEEE 802.16-2009 - 256 subcarriers, cyclic prefix 1/4, 1/8, 1/16 or 1/32		
Supported channel bandwidth	1.75, 3.5, 7 and 10 MHz		
Adaptive modulation	BPSK, QPSK, 16QAM and 64QAM		
FEC code rate	1/2, 2/3 and 3/4 concatenated Reed-Solomon and Viterbi		
Maximum output power	+24 dBm		
Transmit power control	> 40 dB		
Duplexing method	TDD (Time Division Duplexing)		
Uplink/Downlink allocation	Programmable from 4:1 to 1:4		
Dynamic Frequency Selection	Yes		
TDD synchronization	External or internal references (10 MHz, tpps). Requires ARBA-IDU unit		
Antenna connector	N-type, 50 ohms		
RF parameters			
	Modulation	Sensitivity (1.75 MHz)	Sensitivity (10 MHz)
	BPSK-1/2	-99.5 dBm	-92 dBm
	QPSK-1/2	-95.5 dBm	-89 dBm
	QPSK-3/4	-94 dBm	-85.5 dBm
	16QAM-1/2	-91 dBm	-83.5 dBm
	16QAM-3/4	-87.5 dBm	-80 dBm
	64QAM-2/3	-83.5 dBm	-76 dBm
	64QAM-3/4	-81.5 dBm	-74 dBm
Data traffic and Throughput			
Maximum over-the-air data rate	37.7 Mbps (64QAM-3/4, 10 MHz BW)		
Max Ethernet aggregated throughput	Basic	20 Mbps (40Mbps in 20MHz)	
	Advanced (1)	34.9 Mbps (69.8Mbps in 20MHz)	
ARQ support	Yes, per IEEE 802.16-2009 standard - Selectable per service flow		
Simultaneous registered users	Basic	20	
	Advanced (2)	Unlimited	
Encryption	AES and 3DES		
Quality of Service (QoS)			
Supported QoS types	UGS, RTPS, nRTPS and BE (IEEE 802.16-2009 standard)		
Service differentiation	Layer-2	MAC source/destination address, EtherType, VLAN tag	
	Layer-3	DSCP ToS, IP source/destination address and subnet, Protocol type	
	Layer-4	TCP, UDP source/destination port range	
Differentiated service flows	Basic	One bidirectional service per user	
	Advanced (3)	Unlimited differentiated services per user	
Management and Provisioning			
Management local interfaces	Web, Command-Line Interface		
Management remote interfaces	SNMP, XML-RPC		
User and services local provisioning	XML local database		
User and services centralized provisioning	AAA Radius, LDAP, XML-RPC		
Network functionality			
Layer-2 Network functionality	Bridging (IEEE 802.1), VLAN (IEEE 802.1q)		
Layer-3 Network functionality	Static/Dynamic routing, NAT, DHCP server/client		
Supported CS	Ethernet, IPv4oEthernet, VLAN, IPv4oVLAN		
Networking modes	Bridge mode, IP routing		
Data interface	10/100 Base-T Ethernet RJ45		
Physical, Mechanical and Electrical			
Size	395 x 295 x 95 mm		
Outdoor Unit Weight	3.2 kg		
Power Supply	Basic	802.3af compliant (PoE)	
	Optional	12 or 48 Volts (separate connector for solar panel supply)	
Power Consumption	<18 Watts (full traffic conditions)		
Standards Compliance			
WiMAX	IEEE 802.16-2009 OFDM PHY		
Radio	ETSI EN 301 893, ETSI EN 302 502		
Environmental	ETSI EN 300 019-1-4 C4.1E (ODU), ETSI EN 300 019-1-3 C3.2 (IDU)		

Note 1: Extended throughput [34.49Mbps/10MHz] requires option ARBA-500-THR

Note 2: Unlimited registered users requires option ARBA-500-USR

Note 3: Unlimited differentiated service flows requires option ARBA-500-MDS

### ORDERING INFORMATION

Outdoor Units		Indoor Units	
ARBA-556	ARBA-500 base system 5470-5725 MHz	ARBA-PSE	Power supply injector (included in all ARBA-500 base systems)
ARBA-558	ARBA-500 base system 5725-5825 MHz	ARBA-DU-1	Single-sector rack-mount indoor unit with sync external reference
ARBA-500-THR	Extended throughput up to 34.4 Mbps	ARBA-DU-4	Four sector rack-mount indoor unit with sync external or internal references
ARBA-500-USR	Unlimited registered users	ARBA-DU-CH	Multiple-sector rack-mount indoor chassis
ARBA-500-MDS	Unlimited differentiated service flows per user		

**albenia**  
Systems

albenia systems s.a.  
C/ Margarita Salas, 22 - 28918 Leganés - Madrid (SPAIN)  
Tel: +34 91 440 0213  
Fax: +34 91 440 0569  
E-mail: sales@albenia.com

[www.albenia.com](http://www.albenia.com)

The above specifications are subject to change and are for information purposes only. Albenia Systems reserves the right to make changes to specifications and appearance of products described in this data sheet at any time without notice.

© July 2009 Albenia Systems SA

Figura B.3: Especificaciones equipos WiMAX - 2

## Introduction / features

PC Engines ALIX boards are small form factor system boards optimized for wireless routing and network security applications.

- AMD Geode LX CPU, 433 MHz (LX700) or 500 MHz (LX800) 5x86 CPU,
- 256 KB cache (64K data + 64K instruction + 128K L2)
- 1 to 3 Ethernet channels (Via VT6105M, 10 / 100 Mbit/s)
- 1 or 2 miniPCI sockets for 802.11 wireless cards and other expansion
- 1 miniPCI Express socket for GSM / UMTS cards (ALIX.6)
- 128 or 256 MB DDR SDRAM, 64 bit wide for high memory bandwidth
- 512 KB flash for PC Engines tinyBIOS
- CompactFlash + optional 44 pin IDE header for user's operating system and application
- 7 to 18V (absolute maximum) DC supply through DC jack or passive power over Ethernet
- 1 serial port (DB9 male, RXD / TXD only)
- 2 USB 2.0 ports (optional)
- Header for LPC bus (use for flash recovery or I/O expansion)

## OEM options

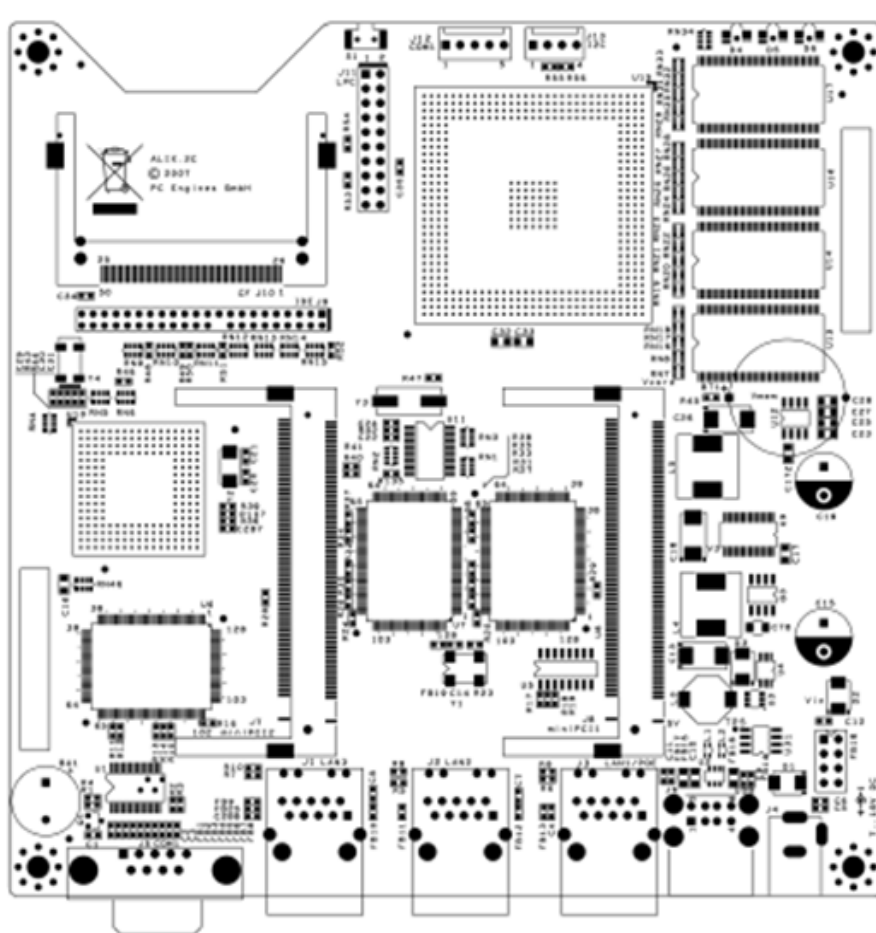
The following options can be configured for larger orders:

- DRAM size (128 MB, 256 MB)
- CPU speed (LX700 / LX800 / LX900)
- Delete I/O not required by customer
- CMOS level serial port (RXD / TXD only)
- Optional header for I2C bus
- Optional buzzer for "beeps"
- Optional RTC battery
- ALIX.3: optional AC97 audio codec (headphone + mic)
- ALIX.3: optional VGA video
- ALIX.3: optional pushbutton switch

Figura B.4: Especificaciones Placa Alix - 1

## ALIX.2 series

Configuration	2 LAN / 2 miniPCI, or 3 LAN / 1 miniPCI
Power supply	7 to 20V DC, about 3 to 4W at Linux idle, peak about 6W without miniPCI cards and USB devices. Suggest a 18V / 15W supply. Center pin = positive, sleeve = ground, 2.1 mm diameter.
Temperature range	0 to 50°C.
Dimensions	6 x 6" (152.4 x 152.4 mm)



ALIX system board

7

5/5/2010

Figura B.5: Especificaciones Placa Alix - 2

## Introduction / features

WRAP is a small single board computer optimized for wireless access and network routing applications.

- National SC1100 CPU, 233 or 266 MHz 5x86 CPU, 16KB cache
- 2 or 3 Ethernet channels (National DP63816); 1 channel on WRAP.2B
- 2 or 1 miniPCI sockets for 802.11 wireless cards and other expansion
- 64 MB SDRAM, 64 bit wide for high memory bandwidth
- 128 KB flash for tinyBIOS system BIOS.
- CompactFlash header for user's operating system and application
- 7 to 18V DC supply through DC jack or passive power over LAN 1 connector
- 1 serial port (DB9 male)
- Watchdog timer built into SC1100 CPU
- LM77 thermal monitor (not on WRAP.2D or WRAP.2E)
- Header for I2C bus (can be used for front panel interface)
- Header for LPC bus (can be used for I/O expansion)
- 3 LEDs and 1 pushbutton switch, freely programmable.

## OEM options

The following accessories are available:

- CompactFlash cards
- Power over Ethernet injector POE.1A

The following options can be configured for larger orders:

- DRAM size (32 MB, 64 MB, 128 MB)
- 1 or 3 Ethernet channels (limit to 1 miniPCI if 3 Ethernet)
- 1 or 0 Serial ports
- Delete front panel LEDs and switch
- Custom BIOS adaptations as needed
- Full BIOS source can be licensed for adaptation by OEM
- USB port (no power over Ethernet, 5V DC supply only)
- Full custom board versions.

Figura B.6: Especificaciones Placa Wrap - 1

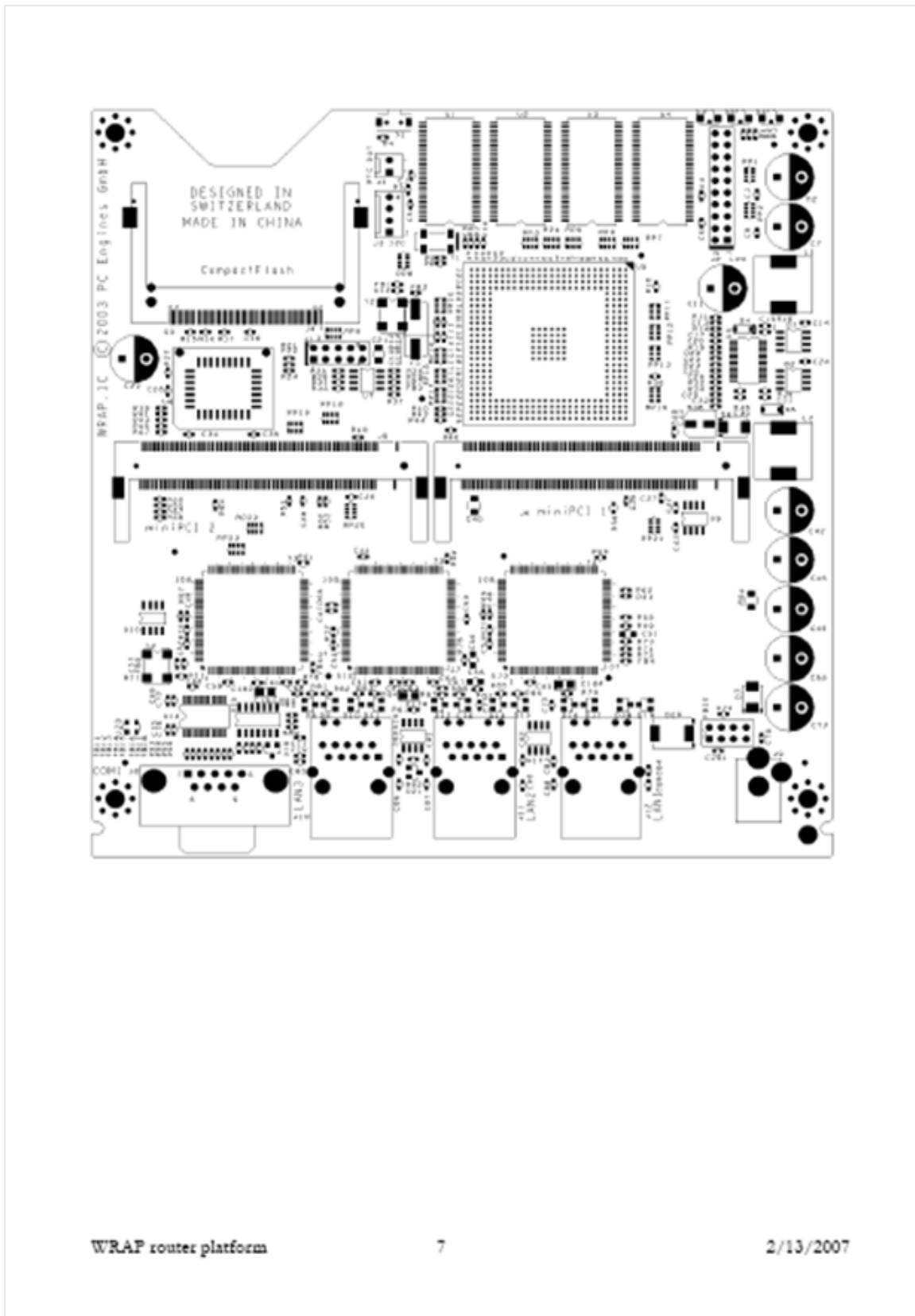


Figura B.7: Especificaciones Placa Wrap - 2





# Bibliografía

- [1] IEEE 802.11. IEEE 802.11-2007 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Computer Society., 2007.
- [2] ITU. ITU-T recommendation Y.1540 (11/07): IP packet transfer and availability performance parameters. Technical report, International Telecommunication Union.
- [3] Sandra Salmerón N. Parametrización de ieee 802.11e edca para la priorización del tráfico voip en redes extensas para zonas rurales de países en vías de desarrollo. *III jornadas de Ingeniería Telemática JITEL*, 2001.
- [4] R. Patra, S. Nvedevschi, S. Surana, and E. Brewer. Deploying a rural wireless telemedicine system: Experiences in sustainability. *Computer*, 41(6):48–56, 2008.
- [5] B. Raman and K. Chebrolu. Experiences in using wifi for rural internet in india. *Communications Magazine, Special Issue on New Directions In Networking Technologies In Emerging Economies*.
- [6] A. Martínez, M. Dulcey, J. Seoane, R. Shoemaker, D. Villarroel, V. López, A. Rendón, and J. Simó. Rural telemedicine infrastructure and services in the department of cauca, colombia. *Telemedicine Journal and e-Health*, 2005.
- [7] P. Osuna, D. Espinoza, L. Camacho, J. Simó, and R. Quispe. Application of ieee 802.11 technology for health isolated rural environments. *in poc. WCIT*, 2006.
- [8] J. Ramiro, A. Martínez, S. Salmerón, and J. Simó. Traffic engineering in rural wireless networks for developing countries using IEEE 802.11 EDCA. *IEEE WRECOM*, 2007.
- [9] J. Simó, S. Salmerón, and R. Patra. Comparison of mac protocols for 802.11 based long distance networks. *Workshop Wireless For Development. WIRELESS4D*, 2008.
- [10] IEEE 802.16. 802.16-2009 IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: Air interface for fixed and mobile wireless access systems., 2009.
- [11] Director de la BDT. Wimax an efficient tool to bridge the digital divide. WiMAX forum. 2005. URL [www.wimaxforum.org/technology/downloads](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads).
- [12] ONU e ITU. Cumbre mundial sobre la sociedad de la información CMSI)., Ginebra 2003 - Tunez 2005.

- [13] S. Cohen, G. Cayla, and D. Guigon. Informe sobre el desarrollo de las telecomunicaciones tic: Examen intermedio de los objetivos de la cmsi. *WTDC10/83-S*, 2010.
- [14] ONU. Objetivos de desarrollo del milenio. informe 2008, 2008.
- [15] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin. Resource ReSerVation protocol (RSVP) – version 1 functional specification. RFC 2205 (Proposed Standard), sep 1997. URL <http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt>. Updated by RFCs 2750, 3936, 4495.
- [16] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss. An architecture for differentiated service. *Internet proposed standard RFC 2475*, 1998.
- [17] J. Postel. Internet protocol. RFC 791 (Standard), Sep 1981. URL <http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt>. Updated by RFC 1349.
- [18] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, and D. Black. Definition of the differentiated services field (DS field) in the IPv4 and IPv6 headers. RFC 2474 (Proposed Standard), Dec 1998. URL <http://www.ietf.org/rfc/rfc2474.txt>. Updated by RFCs 3168, 3260.
- [19] K. Gakhar, A. Gravey, and A. Leroy. IROISE: a new QoS architecture for IEEE 802.16 and 802.11e interworking. In *2nd International Conference on Broadband Networks*, 2005.
- [20] H. Haffajee and A. H. Chan. Low-cost QoS-enabled wireless network with interworked WLAN and WiMAX. 2005.
- [21] L. Berlemann, Ch. Hoymann, R. Hiert G., and S. Mangold. Coexistence and Interworking of IEEE 802.16 and IEEE 802.11(e). In *VTC 2006-Spring*, 2006.
- [22] S. Frattasi, E. Cianca, and R. Prasad. An Integrated AP for Seamless Interworking of Existing WMAN and WLAN Standards. In *Wireless Personal Communications*, volume 36, page 445–459, 2006.
- [23] P. Neves, S. Sargento, and R. L. Aguiar. Support of real-time services over integrated 802.16 metropolitan and local area networks. In *11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'06)*, 2006.
- [24] J. Jackson, J. Roy, V. Vaidehi, and S. Srikanth. Always Best-Connected QoS integration model for the WLAN, WiMAX Heterogeneous Network. In *First International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2006*, 2006.
- [25] D. Niyato and E. Hossain. Integration of WiMAX and WiFi: Optimal Pricing for Bandwidth Sharing. In *IEEE Communications Magazine*, pages 140–146, 2007.
- [26] D. Niyato and E. Hossain. Hierarchical Model for Bandwidth Management and Admission Control in integrated IEEE 802.16/802.11 Wireless Networks. In *IEEE WCNC'2007*, 2007.
- [27] P. Djukic and S. Valaee. Towards guaranteed QoS in mesh networks: Emulating WiMAX mesh over WiFi hardware. In *27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'07)*, 2007.

- [28] T. Ali-Yahiya, K. Sethoml, and G. Pujolle. Seamless Continuity of Service across WLAN and WMAN Networks: Challenges and Performance Evaluation. 2007.
- [29] T. Ali-Yahiya, A. Beylot, and G. Pujolle. Policy-based threshold for bandwidth reservation in WiMAX and WiFi wireless networks. In *Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07)*, 2007.
- [30] R. Kumar, V. Sagar, S. Kumar, A. M. Lele, and D. Das. A novel interface gateway architecture for seamless interoperability between 802.11e and 802.16e. In *submitted to Comsware 2008*, 2008.
- [31] A. Prasath G., R. Raghu K., and Maode Ma.
- [32] A. Al-Sherbaz, C. Adams, and S. Jassim. Private synchronization technique for heterogeneous wireless network (WiFi and WiMAX). 2008.
- [33] E.W.C. Peh, K. Seah W., Y.H. Chew, and Y. Ge. Experimental study of voice over ip services over broadband wireless networks. In *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pages 834–839, 2008.
- [34] H-T. Lin, Y-Y. Lin, W-R. Chang, and R-S. Cheng. An Integrated WiMAX/WiFi Architecture with QoS Consistency over Broadband Wireless Networks. In *IEEE*, 2009.
- [35] N. Ghazisaidi, H. Kassaei, and M. Saeed Bohlooli. Integration of WiFi and WiMAX-Mesh Networks. In *Second International Conference on Advances in Mesh Networks*, 2009.
- [36] Y. Kanamori, K. Kawano, K. Kinoshita, and K. Murakami. An Effective Dynamic Spectrum Assignment in WiFi/WiMAX Integrated Networks. In *Eight International Conference on Networks*, 2009.
- [37] D-ITG. URL <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>.
- [38] Proyecto OPEN – REACH. Entregable N°10. Technical report, Albentia Systems S.A, Universidad Rey Juan Carlos, Ingenova Consulting SLU., 2007.
- [39] MadWifi Project. URL <http://madwifi-project.org/>.
- [40] ITU. International telecommunication union. URL <http://www.itu.int>.
- [41] Albentia Systems S.A. ARBA550 BS Series User Guide. URL [www.albentia.com](http://www.albentia.com).
- [42] LARTC Project. Linux advanced routing & traffic control. URL <http://www.lartc.org/>.
- [43] Hemminger, Stephen, and A. Kuznetsov. The linux foundation, iproute2. URL <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/iproute2>.
- [44] M. Devera. HTB Home. URL <http://luxik.cdi.cz/~devik/qos/htb/>.
- [45] G. Bianchi and G. Tinnirello. Remarks on IEEE 802.11 DCF performance evaluation. *IEEE Communications Letters*, 9(8):765–767, 2005.

- [46] Carlos García G. Propuesta de arquitectura de QoS en entorno inalámbrico 802.11e basado en Diffserv con ajuste dinámico de parámetros. *Universidad Carlos III de Madrid*, 2006.
- [47] A. Banchs, A. Azcorra, C. García, and R. Cuevas. Applications and challenges of the 802.11e EDCA mechanism: An experimental study. In *IEEE Network Magazine.*, volume 19, 2005.