

**INTEGRACIÓN WIMAX Y WIFI CON SOPORTE DE QoS MEDIANTE
DISPOSITIVOS DE ENRUTAMIENTO BAJO LA PLATAFORMA LINUX**



**Universidad
del Cauca**

Trabajo de Grado

Julián Andrés Rojas Nieto

Director del proyecto:

Ing. Iván Eduardo Hernández Delgado

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telemática
Popayán, Marzo 2017**

Tabla de contenido

Capítulo 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CONTEXTO GENERAL	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 ESCENARIO DE MOTIVACIÓN	4
1.4 HIPÓTESIS	4
1.5 OBJETIVOS	5
1.5.1 Objetivo General.....	5
1.5.2 Objetivos Específicos.....	5
1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO	5
1.6.1 Planteamiento del problema y postulación de hipótesis.	5
1.6.2 Experimentación.....	6
1.6.3 Conclusiones.....	6
1.7 ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFÍA.....	7
Capítulo 2.....	8
MARCO DE REFERENCIA	8
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	8
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	11
2.2.1 CALIDAD DE SERVICIO (QoS).....	11
2.2.1.1 Parámetros de QoS.	12
2.2.1.1.1 Jitter (Variación del retardo).	13
2.2.1.1.2 Packet Loss (Pérdida de paquetes).	14
2.2.1.1.3 Delay (Retardo).....	14
2.2.1.1.4 Throughput (Caudal de datos).....	14
2.2.1.2 Provisión de QoS en la capa IP.	15
2.2.1.2.1 IntServ (Servicios Integrados).	16
2.2.1.2.2 DiffServ (Servicios Diferenciados).	16
2.2.2 ESTANDAR 802.11 – WIFI.....	22
2.2.2.1 Provisión de QoS en WiFi	24

2.2.2.1.1	802.11e – EDCA	25
2.2.3	ESTANDAR 802.16 – WIMAX	27
2.2.3.1	Provisión de QoS en WIMAX	28
2.2.4	REDES HETEROGENEAS	31
2.2.4.1	Problemas con la provisión de QoS en redes heterogéneas.	33
Capítulo 3	.....	35
PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN	.....	35
3.1	PROPUESTA DE INTEGRACIÓN WIMAX – WIFI	35
3.2	IMPLEMENTACIÓN DE PROPUESTA DE INTEGRACIÓN WIMAX – WIFI.....	39
3.2.1	MONTAJE DE LA RED.....	39
3.2.1.1	Bloque ER.....	39
3.2.1.2	Bloque WIMAX.....	40
3.2.1.3	Bloque WIMAX/WIFI.	40
3.2.1.4	Bloque WIFI/ER.	41
3.2.1.5	Maqueta de red.....	41
3.2.2	CONFIGURACIÓN DE LA RED.....	42
3.2.2.1	Bloque ER – ALIX1.....	42
3.2.2.2	Bloque WIMAX – BS	46
3.2.2.3	Bloque WIMAX/WIFI – SS/ALIX2.....	48
3.2.2.4	Bloque WIFI/ER – ALIX3	49
Capítulo 4	.....	50
VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA	.....	50
4.1	ESCENARIO DE PRUEBAS.....	50
4.1.1	Consideraciones previas.	52
4.1.2	Plan de pruebas.....	53
4.2	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	54
4.2.1	Escenario de prueba A.	54
4.2.2	Escenario de prueba B.	56
4.2.3	Escenario de prueba C.	59
4.2.4	Escenario de prueba D.	62
4.2.5	Escenario de prueba E.	64
Capítulo 5	.....	66

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	66
5.1 CONCLUSIONES.....	66
5.2 RECOMENDACIONES.....	67
5.3 TRABAJO FUTURO.....	68

Lista de figuras

FIGURA 1.1 ECOSISTEMA DIGITAL [11].	4
FIGURA 1.2 ETAPAS DE DESARROLLO DEL PROYECTO.	5
FIGURA 2.1 CUATRO PUNTOS DE VISTA SOBRE QoS [22].	12
FIGURA 2.2 EJEMPLO DE VARIABILIDAD EN EL RETARDO [24].	13
FIGURA 2.3 BYTE TYPE OF SERVICE IPV4 [28].	15
FIGURA 2.4 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN DOMINIO DIFFSERV [32].	17
FIGURA 2.5 CAMPO DE IDENTIFICACIÓN DIFFSERV – BYTE DS [28].	18
FIGURA 2.6 COMPARACIÓN DE MODELO DE FUNCIONAMIENTO EN 802.11 Y 802.11E [36].	26
FIGURA 2.7 PROCESO DE CONFIGURACIÓN DE CONEXIÓN EN IEEE 802.16 [37].	30
FIGURA 2.8 DESPLIEGUE DE RED HETEROGÉNEA PARA SERVICIO MÓVIL [40].	32
FIGURA 3.1 DISPOSITIVO HIBRIDO PARA TRASPASO DE RED.	36
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE ARQUITECTURA DE RED.	36
FIGURA 3.3 DIAGRAMA EN BLOQUES DEL DISPOSITIVO HIBRIDO PARA EL TRASPASO DE RED.	37
FIGURA 3.4 DIAGRAMA EN BLOQUES DE LA IMPLEMENTACIÓN PROPUESTA.	39
FIGURA 3.5 MONTAJE FÍSICO DE LA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN WIMAX - WiFi.	41
FIGURA 3.6 JERARQUÍA DE CLASES PARA DISCIPLINA DE COLAS HTB.	45
FIGURA 3.7 CONSOLA WEB PARA CONFIGURACIÓN DE FLUJOS DE DATOS EN BS ARBA550 [41].	47
FIGURA 4.1 AMBIENTE DE PRUEBAS.....	50
FIGURA 4.2 MEDICIONES DE RENDIMIENTO POR TRÁFICO - PRUEBA A.	55
FIGURA 4.3 MEDICIONES DE CAUDAL POR TRÁFICO - PRUEBA B.	56
FIGURA 4.4 MEDICIONES DE RETARDO POR TRÁFICO - PRUEBA B.	57
FIGURA 4.5 MEDICIONES DE JITTER POR TRÁFICO - PRUEBA B.	58
FIGURA 4.6 PERDIDA DE PAQUETES POR TRÁFICO - PRUEBA B.....	59
FIGURA 4.7 MEDICIONES DE CAUDAL POR TRÁFICO - PRUEBA C.....	60
FIGURA 4.8 MEDICIONES DE RETARDO POR TRÁFICO - PRUEBA C.	60
FIGURA 4.9 MEDICIONES DE JITTER POR TRÁFICO - PRUEBA C.....	61
FIGURA 4.10 PERDIDA DE PAQUETES POR TRÁFICO - PRUEBA C.	62
FIGURA 4.11 MEDICIONES DE RENDIMIENTO POR TRÁFICO - PRUEBA D.	63
FIGURA 4.12 MEDICIONES DE RENDIMIENTO POR TRÁFICO - PRUEBA E.	65

Lista de tablas

TABLA 2.1 CÓDIGOS DSCP PARA EL PERFIL AF [28].	19
TABLA 2.2 EXTENSIONES DE IEEE 802.11 Y SUS CARACTERÍSTICAS [36].	23
TABLA 3.1 TABLA DE HOMOLOGACIÓN DE CLASES DE TRÁFICO.	38
TABLA 3.2 ESPECIFICACIONES PLACA ALIX 2D2.	40
TABLA 3.3 DETALLE DE BS WiMAX.	40
TABLA 3.4 DETALLE DE SS WiMAX.	41
TABLA 3.5 ESPECIFICACIONES EQUIPOS PC.	42
TABLA 3.6 MAPEO DE CÓDIGOS TOS/DSCP A CLASES DE TRÁFICO HOMOLOGADAS.	43
TABLA 3.7 ASIGNACIÓN DE CAUDAL PARA CADA TIPO DE TRÁFICO EN COLA HTB.	45
TABLA 3.8 RESUMEN DE CONFIGURACIONES EN BLOQUE ER.	46
TABLA 3.9 PARÁMETROS DE QoS EN UNA RED IP [42].	48
TABLA 3.10 ASIGNACIÓN DE CAUDAL POR TIPO DE TRÁFICO EN LA BS WiMAX.	48
TABLA 3.11 RESUMEN DE CONFIGURACIONES EN BLOQUE WiMAX/WiFi.	49
TABLA 3.12 RESUMEN DE CONFIGURACIONES EN BLOQUE WiFi/ER.	49
TABLA 4.1 ESQUEMA DE DIRECCIONAMIENTO PARA EL AMBIENTE DE PRUEBAS.	51

ACRONIMOS

QoS	<i>Quality Of Service - Calidad De Servicio</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability For Microwave Access</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity - Fidelidad Inalámbrica</i>
MAC	<i>Media Access Control - Control De Acceso Al Medio</i>
TIC	<i>Tecnologías De La Información Y Las Comunicaciones</i>
VSaT	<i>Very Small Aperture Terminal – Apertura de Terminal muy Pequeño</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance.</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System - Sistema Universal De Telecomunicaciones Móviles</i>
CRRM	<i>Common Radio Resources Management, Gestión De Recursos Radio Comunes</i>
IP	<i>Internet Protocol – Protocolo De Internet</i>
WLAN	<i>wireless local area network - red de área local inalámbrica</i>
AP	<i>access point – punto de acceso</i>
AQM	<i>Access Network QoS Manager</i>
IAQM	<i>Inter AQM</i>
DS	<i>DiffServ – Servicios Diferenciados</i>
MSH-DSCH	<i>Mesh Distributed Schedule</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol - Protocolo de Transferencia de Archivos</i>
BE	<i>Best Effort - Mejor Esfuerzo</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union - Unión Internacional de Telecomunicaciones</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization - Organización Internacional de Normalización</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force - Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute - Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones</i>

ETNO	<i>European Telecommunications Network Operators' Association -</i>
RTP	Real-time Transport Protocol - Protocolo de Transporte de Tiempo real
UDP	User Datagram Protocol – Protocolo de Datagrama de Usuario
IP - IPTD	IP Packet Transfer Delay – Restardo de Transferencia de Paquetes IP
ToS	Type of Service - Tipo de Servicio
DTS	<i>Defined Type of Service - tipo de servicio definido</i>
D	<i>Delay - retardo</i>
T	Throughput - Caudal de Datos
R	Confiabilidad
IS	IntServ - Servicios Integrados
RSVP	Resource Reservation Protocol – Protocolo de Conservación de Recursos
CR	<i>Core Routers - Nodos interiores</i>
ER	Egress Routers - Nodos frontera
TCA	<i>Traffic Conditioning Agreement - Acuerdo Condicional de Tráfico</i>
CU	<i>Currently Unused - Sin uso</i>
DSCP	Differentiated Services Code Point - Código de servicios diferenciados
BA	Behavior Aggregates - Comportamiento Agregado
PHB	<i>Per Hop Behavior - Comportamiento por salto</i>
EF	<i>Expedited Forwarding</i>
AF	Asured Forwarding
FTP	File Transfer Protocol - Protocolo de Transferencia de Ficheros
AP	Acces Point – Punto de Acceso

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO GENERAL

La sociedad moderna día a día demanda más y mejores sistemas de comunicaciones, por tal motivo tanto a nivel académico como a nivel comercial son planteadas distintas líneas de investigación donde se está buscando brindar solución al problema de asegurar y mantener un nivel de recursos de red suficiente para lograr que las aplicaciones consumidas en dicha red, por cada usuario, operen de manera correcta, es decir, pretende sostener un nivel de “*Calidad de Servicio*” (QoS) que satisfaga las necesidades de cada usuario.

Para cumplir este objetivo, específicamente en redes inalámbricas como WiMAX y WiFi se han establecido mecanismos propios para brindar soporte de QoS, estos están basados en la clasificación de datos, de modo que se brinda un trato diferenciado a los diferentes servicios o aplicaciones utilizadas por cada usuario [1]. Adicionalmente, se ha propuesto la utilización de nuevos protocolos sobre la capa de acceso al medio (MAC) y la capa de enlace de datos, mediante los cuales los dispositivos de red puedan tener mayor control sobre los datos que se encuentran en la red [2].

Sin embargo, bajo condiciones extremas como las presentadas en áreas rurales apartadas de las principales troncales de red estos métodos pueden no ser suficientemente satisfactorios para el usuario final o podrían llegar a ser demasiado costosos para el prestador del servicio. Así pues, una opción que facilita la implantación de redes, en este tipo de zonas, es adaptar y/o combinar diferentes tecnologías de tal manera que pueda lograrse obtener lo mejor de cada tipo de red, minimizando al máximo las desventajas inherentes a cada una de las partes.

Luego, esta nueva red debe ser capaz de proporcionar un nivel de QoS apropiado para cada aplicación o servicio que se esté utilizando, no obstante, el soporte de QoS en redes heterogéneas ha sido abordado desde diferentes perspectivas que en algunos casos representan un alto nivel de complejidad o incluso la utilización de tecnologías no disponibles en el mercado; por lo cual varias de estas propuestas resultan siendo inviables en el ámbito de las zonas rurales.

Entonces, la implementación de un mecanismo que integre las tecnologías WiMAX y WiFi para conformar una red heterogénea que opere adecuadamente en un entorno rural, es decir, que adopte estrategias viables dentro de dicho entorno para brindar soporte de QoS, puede permitir que poblaciones ubicadas en zonas apartadas de las principales troncales de red tengan acceso a los servicios de educación, salud, entretenimiento, etc. que desde estas redes se pueden ofrecer. En este trabajo de grado se explora la posibilidad de desarrollar un mecanismo para la integración de las tecnologías WiMAX y WiFi de modo que se logre conformar una red heterogénea con soporte de QoS de extremo a extremo.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad varios países en desarrollo buscan afrontar problemas sociales como: acceso a la educación, la salud y los altos índices en desempleo, usando como herramienta a las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). Un claro ejemplo de esta iniciativa es el Plan Vive Digital Colombia [3], mediante el cual el estado Colombiano pretende afrontar la actual problemática social a través de la masificación de internet.

Sin embargo, tan solo hablar de masificar el alcance y por ende el consumo de internet sobre la mayor parte de un territorio con tan variada geografía como lo es la zona latinoamericana, implica un gran desafío en términos de tecnología; por un lado, la instalación y despliegue de la infraestructura requerida para soportar la red, enfrenta a grandes barreras geográficas que dificultan el acceso a personal y materiales, sin mencionar los desafíos propios planteados en las obras de construcción de cada estructura. Debido a esto, algunas entidades, tanto públicas como privadas, han descartado la posibilidad de tal despliegue de red, pues el esfuerzo económico que esto requiere es demasiado grande, además, en los países en desarrollo, es muy común encontrarse con poblaciones localizadas en áreas aisladas e inhóspitas, donde la cantidad de habitantes hace que no resulte rentable llevar un servicio de este tipo [4].

Ahora bien, con el fin de enfrentar o mitigar las barreras geográficas planteadas para estas zonas alejadas, podría pensarse en el uso de tecnologías de red inalámbrica, tales como WiMAX [5] [6], VSaT [7] o WiFi [4], puesto que este tipo de redes brindan cobertura sobre grandes distancias logrando sortear más fácilmente los inconvenientes geográficos en comparación con las redes alámbricas. No obstante, en el caso de VSaT, aunque técnicamente resuelve el inconveniente regresa al punto de los costos elevados haciendo esta opción inviable para muchas de estas poblaciones.

Luego, para el contexto planteado, una opción como WiFi resulta más viable teniendo en cuenta que el consumo de energía de los equipos es reducido así como el precio al cual pueden encontrarse en el mercado, además la posibilidad de usar las bandas no licenciadas de 2.4 GHz y 5.8 GHz reduce también los costos de operación de esta red. Sin embargo, el problema con esta tecnología radica en su funcionamiento; por un lado en la capa MAC opera utilizando el protocolo CSMA/CA, el cual para enlaces de larga distancia provoca errores debido a retardos y colisiones en la transmisión. Por otro lado es sensible a la interferencia de enlace múltiple que sobre esta red resulta en una elevada tasa de error. Entonces el hecho de realizar el despliegue e instalación de la infraestructura requerida para soportar una red basada en la tecnología WiFi, que logre dar acceso a internet a una zona apartada de las principales troncales de red, no es suficiente, esto debido a que actualmente las aplicaciones y/o servicios diseñados para trabajar sobre una red de este tipo, día a día aumentan los requerimientos de QoS [8] para operar correctamente.

Así pues, teniendo en cuenta que el objetivo fundamental de implementar una red que de conexión a zonas inhóspitas es brindar servicios que comprometen voz y video en tiempo real, es necesario que dicha red asegure las condiciones o cumpla con los requisitos de QoS para que tales servicios funcionen de la mejor manera. En este sentido y centrándose en el contexto de las redes de telecomunicaciones, el término QoS puede entenderse como la capacidad de una red para garantizar las condiciones que cumplan con los requisitos del tráfico generado o que transite a través de esta [9].

Analizando lo anterior, el estándar 802.16 WiMAX es presentado como una posible solución, pues a pesar de haber sido concebida para funcionar como una red metropolitana de área extendida, brinda una comunicación orientada a conexión con soporte de QoS, es decir, una estación base solo permite el acceso a la red, de una estación suscriptora, siempre y cuando pueda cumplirse con los requisitos de QoS solicitados por esta última y además no se altere el estado de conexión de las estaciones suscriptoras ya conectadas. Desafortunadamente los equipos WiMAX resultan muy costosos en comparación con un equipo para WiFi, adicionalmente, estos equipos requieren de un nivel de potencia elevado teniendo en cuenta que las instalaciones eléctricas, en las zonas de competencia de este proyecto, son deficientes y su nivel de potencia es bajo (alrededor de 1500 W) [10].

Con base en lo anterior, es claro que tanto WiFi como WiMAX presentan diversas ventajas y desventajas en cuanto a costos y modos de operación con soporte de QoS, por tal motivo y buscando operar bajo las difíciles condiciones planteadas para zonas inhóspitas, especialmente las mencionadas en cuanto a costos de implantación y mantenimiento, la siguiente pregunta de investigación es planteada:

¿Cómo integrar los estándares 802.11 y 802.16, por medio del uso de software libre, para la creación de una red heterogénea con soporte de QoS de extremo a extremo?

1.3 ESCENARIO DE MOTIVACIÓN

En el contexto nacional, el Plan Vive Digital 2010 - 2014 dejó como reto para el cuatrero 2014 - 2018 llenar la autopista de información desplegada en el país con más contenido y más aplicaciones que contribuyan a consolidar un país en paz, más equitativo y más educado [3], haciendo énfasis en la generación de contenidos para sectores con alto impacto en la reducción de la pobreza como son agricultura, educación y salud.

Así pues, en el marco del Plan Vive Digital 2014 - 2018 se plantea el llamado Ecosistema Digital (Figura 1.1) mediante el cual se pretende facilitar la apropiación del uso de las tecnologías por parte de la población nacional. Uno de los componentes definidos dentro de esta estrategia es el de "Infraestructura", dentro del cual una de las metas es: "lograr que todos los centros poblados rurales con más de 100 habitantes cuenten con un sitio de acceso público a internet [11].



Figura 1.1 Ecosistema Digital [11].

1.4 HIPÓTESIS

Analizando la descripción del problema y lo planteado en el estado del arte, la hipótesis que se presenta en esta investigación es:

- Al integrar segmentos de red WiMAX con segmentos de red WiFi mediante dispositivos de enrutamiento bajo la plataforma Linux, es posible generar una red heterogénea con soporte de QoS de extremo a extremo.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General.

Proponer un mecanismo para la interconexión entre redes WiMAX y WiFi que permita el soporte de QoS de extremo a extremo.

1.5.2 Objetivos Específicos.

- ✓ Proponer un mecanismo para realizar mapeo de tráfico a nivel IP, que permita relacionar los tipos de servicio definidos en WiMAX con los definidos en WiFi, a través del empleo de software libre.
- ✓ Implementar el mecanismo propuesto en dispositivos de enrutamiento que trabajen bajo la plataforma Linux.
- ✓ Evaluar experimentalmente el mecanismo implementado en un ambiente laboratorio.

1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para proponer un mecanismo para la interconexión entre redes WiMAX y WiFi que permita el soporte de QoS de extremo a extremo, es necesario seguir los pasos o procedimientos planteados por el modelo para la Investigación Científica [12], los cuales conllevan al cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente proyecto de grado, la Figura 1.2 muestra las diferentes etapas del proceso.

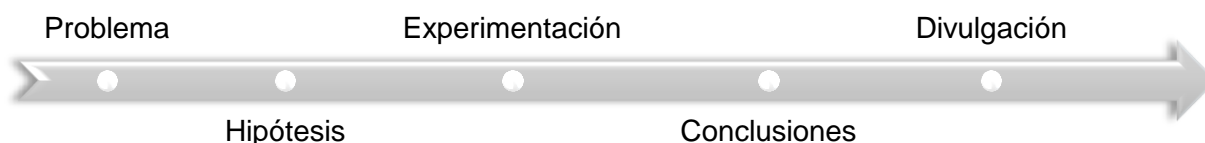


Figura 1.2 Etapas de desarrollo del proyecto.

1.6.1 Planteamiento del problema y postulación de hipótesis.

En la primera etapa del proyecto se realiza el planteamiento del problema y la postulación de la hipótesis bajo la cual se ha construido la solución propuesta. Esta información se puede encontrar en la primera parte del presente capítulo.

1.6.2 Experimentación.

Esta etapa ha sido dividida en distintas fases, tal como se aprecia a continuación.

- a) **Fase 1 – Estado del arte:** En esta fase se realiza la recopilación de documentos científicos y/o propuestas comerciales relacionadas con el tema: integración de WiMAX y WiFi para conformar redes heterogéneas con soporte de QoS de extremo a extremo. Esto con el fin de obtener una idea clara sobre el estado actual del tema de investigación así como un acercamiento hacia una posible solución para el problema planteado. El resultado de esta investigación documental se puede encontrar en la primera parte del segundo capítulo de este documento.

- b) **Fase 2 – Fundamentación teórica:** En este apartado se realiza una investigación teórica acerca de la QoS, su definición y la importancia que tiene sobre las redes de nueva generación; del mismo modo, se profundiza en cuanto a los mecanismos para ofrecer QoS implementados en redes WiMAX y redes WiFi; además, se realiza un acercamiento hacia las estrategias para brindar QoS en redes heterogéneas y los inconvenientes que dicha implementación presenta. Con este proceso se buscó obtener un fundamento más fuerte acerca de QoS y de las tecnologías involucradas en la presente propuesta de integración. El contenido de esta investigación se puede encontrar en el capítulo 2 del presente documento.

- c) **Fase 3 – Diseño de propuesta:** A partir del análisis de la información recopilada en las fases previas, se procede a presentar la propuesta de integración de WiMAX y WiFi para conformar una red heterogénea con soporte de QoS de extremo a extremo.

- d) **Fase 4 – Validación de la propuesta:** Detallada la propuesta de integración, se procede a presentar el plan de pruebas de validación, que certifique el buen desempeño de la implementación realizada.

1.6.3 Conclusiones.

Finalmente y bajo un entorno controlado de laboratorio, se llevan a cabo las pruebas planteadas en la estrategia de validación de la propuesta, para de esta manera obtener las mediciones y los puntos de referencias, a partir de los cuales se brindará un resultado concreto acerca de la validez de la integración propuesta.

1.7 ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFÍA

La presente monografía está organizada como se menciona a continuación.

Capítulo 1: INTRODUCCION, se presenta el problema, el contexto en el cual este se desenvuelve, los objetivos del presente proyecto y la metodología mediante la cual estos serán abordados.

Capítulo 2: MARCO DE REFERENCIA, se expone el estado del arte del contexto presentado así como la definición conceptual de QoS, los parámetros de desempeño, la QoS sobre IP, los mecanismos para ofrecer QoS en redes WiMAX y WiFi.

Capítulo 3: PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN, se describe el proceso de análisis y construcción del mecanismo propuesto para la creación de una red heterogénea WiMAX-WiFi con soporte de QoS de extremo a extremo.

Capítulo 4: VALIDACIÓN DEL MECANISMO PROPUESTO, Se presentan las herramientas de soporte, las configuraciones de los equipos, las funcionalidades a evaluar y el análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se presentan las conclusiones del trabajo de grado, recomendaciones y trabajos futuros a desarrollar en esta área.

Capítulo 2

MARCO DE REFERENCIA

2.1 ESTADO DEL ARTE

Durante el proceso de investigación que involucra este documento, fue realizada una búsqueda de trabajos que enfocan sus esfuerzos en la integración de las tecnologías de red inalámbrica WiMAX y WiFi, con el fin de crear una red heterogénea que brinde soporte de QoS de extremo a extremo. De los cuales es válido mencionar:

Información del documento.
Título: Channel Management In Collocated <u>Wifi-Wimax</u> Networks [13]
Año: 2010
Descripción y aportes.
<ul style="list-style-type: none">Este proyecto propone un "algoritmo de priorización de intercambio de recursos en redes integradas <u>WiMax-WiFi</u>", con el cual es realizado un control de acceso a la red basado en la disponibilidad de canales y en la priorización de usuarios. La propuesta es evaluada mediante una simulación basada en el modelo de cadenas de <u>Markov</u>, con la cual es observable que este algoritmo ofrece menor probabilidad de bloqueo (congestión) y una utilización más eficiente del canal en comparación con otros modelos.
Área y tecnologías.
<ul style="list-style-type: none">Control de acceso.Interoperabilidad entre <u>WiMAX</u> y <u>WiFi</u>
Brechas existentes.
<ul style="list-style-type: none">La priorización de acceso es realizada teniendo en cuenta tan solo el tipo de usuario y la red de acceso, por lo cual la identificación de tráfico y el soporte de <u>QoS</u> basado en este son planteados como trabajo a futuro.

Información del documento.
Título: Performance Of A Heterogeneous Network With <u>Umts</u> , <u>Wifi</u> And <u>Wimax</u> [14]
Año: 2011
Descripción y aportes.
<ul style="list-style-type: none">Este proyecto presenta una red heterogénea donde cada usuario podrá acceder a la red por medio de UMTS, <u>WiFi</u> o M – <u>WiMAX</u>, por lo cual es planteado un algoritmo de acceso a la red basado en CRRM (<u>Common Radio Resources Management</u>, Gestión de Recursos Radio Comunes), el cual define la prioridad de acceso, de acuerdo a una tabla, aquí establecida, que confronta servicio contra red utilizada para el acceso.

Área y tecnologías.

- Control de acceso.
- Interoperabilidad entre WiMAX y WiFi

Brechas existentes.

- La validación de la propuesta es realizada mediante simulación de modo que no existe una visión de su desempeño en un entorno real.
- El soporte de QoS es establecido mediante el control de acceso en capa MAC dejando como trabajo futuro el estudio sobre capa IP.

Información del documento.

Título: A new resource distribution model for improved QoS in an integrated WiMAX/WiFi architecture. [15]

Año: 2011

Descripción y aportes.

- Es presentada una arquitectura que permite la convergencia entre los estándares 802.16 y 802.11 mediante un WLAN AP que soporta los dos estándares y en la cual es implementado un algoritmo de planificación adaptativa para soportar las clases de QoS, es decir, son mapeados los requisitos de tráfico WiFi y son traducidos a las clases de QoS definidas por WiMAX. Además propone también un algoritmo para realizar la asignación de recursos en los puntos de acceso (AP) WiFi.

Área y tecnologías.

- Hybrid Access Point.
- Implementación de QoS.
- Interoperabilidad entre WiMAX y WiFi

Brechas existentes

- La validación de la propuesta es realizada mediante simulación de modo que no existe una visión de su desempeño en un entorno real.
- La estrategia de control de admisión está planteada como trabajo futuro.

Información del documento.

Título: A QoS Management Architecture In Heterogeneous Wireless Networks Enviroments. [16]

Año: 2012

Descripción y aportes.

- En este documento es propuesta una arquitectura que de soporte de QoS de extremo a extremo a través de diferentes redes de acceso, para ello son implementadas las funciones AQM (Access Network QoS Manager) e IAQM (Inter AQM), encargadas de gestionar la QoS en la red local y en el paso de una a otra de las redes que conforman la red heterogénea, respectivamente. Además, propone también la utilización del modelo DiffServ como método para realizar el mapeo de tráfico entre diferentes sistemas.

Área y tecnologías.

- Control de acceso.
- Interoperabilidad entre redes inalámbricas.
- DiffServ.
- Mapeo de tráfico.

Brechas existentes.

- La validación de la propuesta es realizada mediante simulación de modo que no existe una visión de su desempeño en un entorno real.

Información del documento.

Título: Interoperability Of Wifi And Wimax. [17]

Año: 2012

Descripción y aportes.

- Este trabajo analiza los detalles técnicos de la arquitectura de cada red, son discutidas las cuestiones implicadas en la integración de estas dos redes y brinda una breve introducción de algunos métodos propuestos para la integración de WiFi y WiMAX al final del artículo.

Área y tecnologías.

- WiFi
- WiMAX
- Interoperabilidad entre WiMAX y WiFi

Brechas existentes.

- Basados en las características de la arquitectura de cada red, proponen varias estrategias de integración, sin embargo la validación de estas propuesta como trabajo futuro para investigadores en el campo de las redes WiMAX.

Información del documento.

Título: Mediciones y aprendizaje estadístico aplicado a problemas de redes inalámbricas. [18]

Año: 2012

Descripción y aportes.

- Este documento propone una metodología de medición activa a través de la cual puedan obtenerse datos estadísticos con el fin de prever el comportamiento de una red híbrida WiFi-WiMAX con múltiples saltos, de modo que, a partir de la información recolectada sea realizada la estimación de ciertos parámetros de QoS y sean configurados los elementos de red de acuerdo a estos.

Área y tecnologías.

- Parámetros de QoS.
- Control de acceso.

Brechas existentes.

- La validación de la propuesta es realizada mediante simulación, de modo que no existe una visión de su desempeño en un entorno real.
- Para brindar soporte de QoS tan solo es tenido en cuenta la configuración de los elementos de red a nivel capa física.

Información del documento.
Título: A Tight Coupling Cooperation Scheme In <u>Wifi-Wimax</u> Heterogeneous Mesh Network. [19]
Año: 2013
Descripción y aportes.
<ul style="list-style-type: none">• Este documento propone la implementación de un módulo denominado WFW (<u>WiMAX for WiFi</u>), con el cual logra que <u>WiMAX</u> sea encargado de realizar la asignación y confirmación de ancho de banda requerido por <u>WiFi</u>. Dicho modulo está basado en la modificación del MSH-DSCH de capa MAC.
Área y tecnologías.
<ul style="list-style-type: none">• Interoperabilidad entre <u>WiMAX</u> y <u>WiFi</u>• Control de acceso.
Brechas existentes.
<ul style="list-style-type: none">• La validación de la propuesta es realizada mediante simulación de modo que no existe una visión de su desempeño en un entorno real.• Para brindar soporte de <u>QoS</u> tan solo es tenido en cuenta el segmento <u>WiMAX</u>.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 CALIDAD DE SERVICIO (QoS)

Inicialmente las redes IP no fueron pensadas para brindar un servicio de transmisión de datos en tiempo real, para ese entonces el tráfico generado provenía de aplicaciones tales como el correo electrónico o los servicios ftp para descarga de audio, video, etc. Aunque para este tipo de tráfico, identificado como Best Effort (Mejor Esfuerzo), se hablaba de la necesidad de mantener la integridad de los datos transmitidos, no se contaba con especificaciones de ancho de canal, retardo o un flujo de paquetes que garantizaran una transmisión exitosa.

No obstante, con la evolución de las redes IP y el aumento en el número de usuarios conectados a estas, aparecen nuevos servicios y aplicaciones que cada vez exigen de condiciones más estrictas sobre la red para garantizar un correcto desempeño. Es así como se presenta el concepto de calidad de Servicio - QoS, que a pesar de entenderse desde distintas perspectivas, se orienta hacia la capacidad de la red para garantizar las condiciones que cumplan con los requisitos del tráfico generado por servicios específicos [9], en otras palabras una red con soporte de QoS tiene la capacidad de administrar los recursos disponibles de modo que estos sean asignados a cada paquete de acuerdo a los requerimientos establecidos por el servicio o la aplicación que los ha generado [20].

Esta característica es aún más deseada en redes cuyos recursos son limitados o en aquellas con un gran número de usuarios, en las cuales la gestión de la red resulta

un verdadero reto para los proveedores de este servicio, tanto así, que el nivel de QoS que una red puede ofrecer es uno de los principales indicadores de satisfacción de los usuarios de dicha red.

Sin embargo, medir el nivel de QoS ofrecido por una red es un verdadero reto, esto debido a que cada tecnología de red requiere involucrar nuevos parámetros o conceptos que permitan definir, medir o estandarizar la QoS. Así pues, varias entidades como la ITU, la ISO, IETF, ETSI, ETNO, entre otras, han conformado equipos de trabajo con el fin de presentar una perspectiva de QoS y cómo medirla [20] [21].

Ahora bien, este proyecto se encuentra enfocado en lo planteado por la ITU en la recomendación G.1000 [22], donde se extiende el concepto de QoS abordándolo desde 4 diferentes perspectivas Figura 2.1 y a partir de allí se obtienen los criterios utilizados para evaluar la calidad de las funciones que todo servicio debe soportar [20].



Figura 2.1 Cuatro puntos de vista sobre QoS [22].

Luego, para el contexto de este proyecto es de interés profundizar en cuanto a los parámetros técnicos involucrados en la medición del desempeño de una red, cuando esta brinda soporte de QoS, de modo que se logre dar claridad a los aspectos ya mencionados.

2.2.1.1 Parámetros de QoS.

Teniendo en cuenta la recomendación de la ITU REC G.1000 [22], los principales parámetros de QoS que alteran la prestación de un servicio en tiempo real sobre una red IP son: **throughput**, **delay**, **jitter** y **packet loss**. Cabe mencionar que la importancia de cada uno de estos parámetros se encuentra en función de los

requisitos de las diversas aplicaciones o servicios que se estén utilizando por parte del usuario [21] [23].

A continuación se realiza una breve descripción de los mencionados parámetros.

2.2.1.1.1 Jitter (Variación del retardo).

Este tiempo se define como la variación de los retardos presentados entre paquetes de datos consecutivos que forman parte de un mismo tráfico. El Jitter como se le conoce a esta variación de retardo se incluye como parámetro de calidad de funcionamiento, debido a la importancia que tiene para los sistemas de datos empaquetados en la capa de transporte [20].

Muchos sistemas de transporte presentan Jitter, pero son aquellos servicios enfocados a transmisiones en tiempo real, los que se ven especialmente afectados por los efectos del Jitter. Para estos casos, generalmente se toman medidas para eliminar o reducir significativamente la variación de retardo percibida por el usuario, esto mediante la implementación de un almacenamiento temporal de paquetes, en el receptor, llamado buffer, de modo que los paquetes puedan ser re-ordenados y re-espaciados [20] [24]. En la Figura 2.2 se puede apreciar un ejemplo del proceso mencionado durante una transmisión de voz.

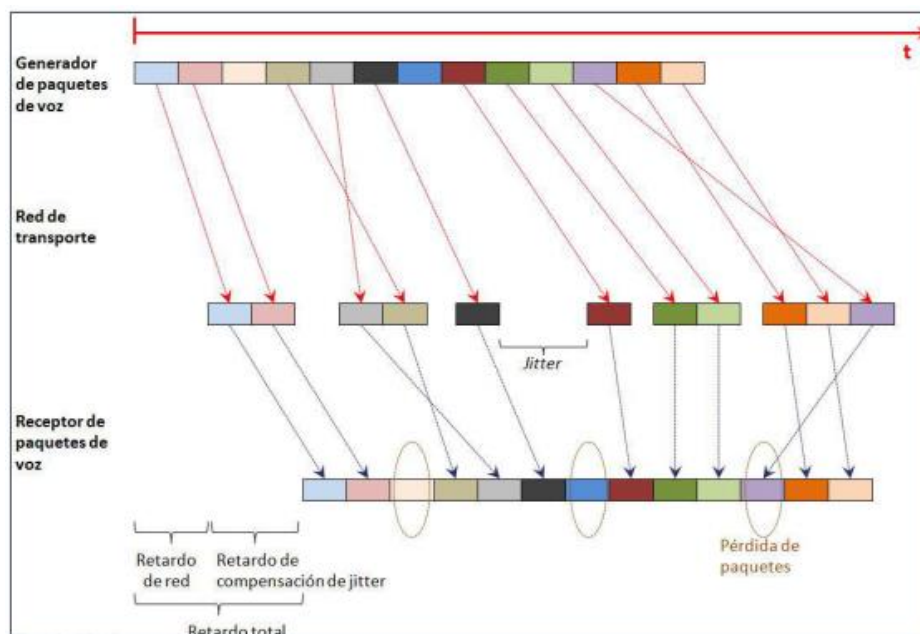


Figura 2.2 Ejemplo de variabilidad en el retardo [24].

En el ejemplo de la Figura 2.2, se evidencia como un alto nivel de jitter puede causar pérdida de paquetes y elevar la tasa de error en una determinada transmisión,

adicionalmente el empleo del buffer en recepción, para tratar de afrontar estos efectos negativos, termina por elevar el nivel de retardo. Esto muestra una estrecha relación entre los parámetros de QoS e indica que todo esfuerzo a realizarse para mejorar el nivel de QoS ofrecida por una red, debe considerar estos parámetros como un conjunto más no ser abordados individualmente.

2.2.1.1.2 Packet Loss (Pérdida de paquetes).

Debido a que IP no es un protocolo 100% confiable, puede suceder que en ciertas circunstancias la información transmitida se vea afectada a causa del descarte o pérdida de paquetes por parte de la red. Esta pérdida de información tiene un efecto negativo en la calidad de la información presentada al usuario final, ya sean datos, imagen, voz o video. Para servicios con requerimientos en tiempo real, el tráfico se implementa sobre UDP (RTP sobre UDP), por lo que el único control que se puede realizar sobre este parámetro es en los extremos de la transmisión [20].

En una sesión, los paquetes se pueden perder por diferentes razones como la congestión, los errores de transmisión y los errores de enlace. Además de este tipo de pérdidas, aparecen pérdidas cuando el retardo extremo a extremo de los paquetes es excesivo, por lo que estos paquetes son inútiles para la sesión, sin importar que lleguen correctamente al receptor [24].

2.2.1.1.3 Delay (Retardo).

Es el tiempo tomado por un paquete en alcanzar el punto final de recepción después de ser transmitido desde un punto de envío. Puede producirse en el equipo del usuario, en los dispositivos de red o en los servidores de aplicaciones, afectando directamente en la satisfacción del usuario en función de la aplicación que se esté utilizando, por ejemplo, para un servicio de transmisión en tiempo real como IPTV, la tolerancia máxima es de un retardo de 100 ms (este umbral es conocido como retardo de transferencia de paquetes IP - IPTD, IP packet Transfer Delay) [25] [26].

Una forma de disminuir este retardo es dándole a los paquetes pertenecientes a aplicaciones sensitivas, cierta prioridad para que en el camino extremo a extremo sean tratado de manera más ágil [26].

2.2.1.1.4 Throughput (Caudal de datos).

Este parámetro se define como la tasa de transferencia de datos de usuario, esto quiere decir la capacidad de datos que un elemento de red puede transmitir en un periodo de tiempo, lo que se traduce como un rendimiento de procesamiento [20].

El throughput puede depender de factores como: la información adicional de encabezados impuesta por el protocolo de comunicación utilizado, la capacidad del sistema de utilizar completamente el ancho de banda proporcionado por el canal de comunicaciones, limitaciones impuestas por el elemento de comunicación de datos, el enlace de comunicación, retardo entre dos puntos, entre otros [20].

Un buen *Throughput* significa que se puede transmitir un mayor número de datos de forma confiable en un menor tiempo, esto implica que se pueden tener aplicaciones más complejas y eficientes [27].

2.2.1.2 Provisión de QoS en la capa IP.

Como ya se ha mencionado, inicialmente las redes IP no fueron diseñadas para brindar soporte de QoS, en lugar de esto se contaba con un modelo o nivel de transmisión, hoy conocido como Best Effort, en el cual, cada paquete de datos que atraviesa la red tiene la misma prioridad, es decir, sin importar de que aplicación proviene la información, la red IP hace lo posible para que cada flujo llegue al destino pero sin garantizar que el paquete llegue sin errores. Por lo tanto en este modelo las aplicaciones inyectan información en la red cada que les es posible, sin previo aviso y en cantidades aleatorias, de modo que, los datos transmitidos solo se entregarán en el destino si la red puede, esto hace que este modelo sea poco confiable [28].

Dada la situación anteriormente planteada, el surgimiento de aplicaciones y servicios más complejos y la demanda de un mejor servicio por parte de los usuarios, surge la necesidad de modificar el modelo de mejor esfuerzo, de modo que las redes IP logren soportar ese tipo de servicios de un modo más eficiente. Así pues, aparece la propuesta de reservar un byte de la cabecera IP, bajo el nombre ToS (“*Type of Service*”, Tipo de Servicio) [28] estructurado como se ve en la Figura 2.3.

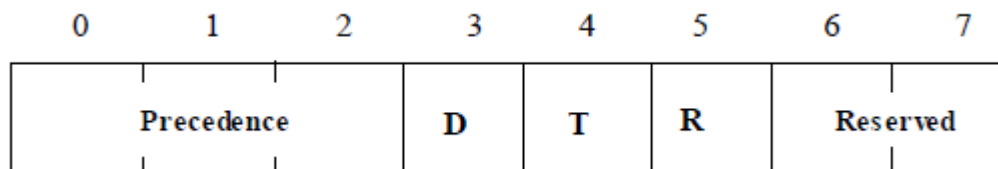


Figura 2.3 Byte Type of Service IPv4 [28].

En el cual, el primer campo denominado “Precedence”, es un intento de marcador de prioridad de paquete, donde 7 indica la más alta prioridad y 0 la más baja. El siguiente campo nombrado como DTS (“*Defined Type of Service*”, tipo de servicio definido) conformado por los bits llamados: D – retardo, T – throughput y R –

confiabilidad. Los últimos bits fueron reservados para uso futuro (posteriormente se propuso usar estos dos bits para realizar la convergencia hacia IPv6) [28].

Aunque este modelo implementa cierto nivel de QoS y evade el inconveniente de sacrificar la escalabilidad de la red, puesto que la información para brindar QoS se encuentra en el paquete de datos mas no en los nodos de red, si presenta problemas para la administración y gestión del tráfico, ya que al tener tan solo tres bits en Precedence limita a ocho los posibles tipos de tráfico, además, de presentarse dos paquetes con el mismo valor en Precedence el administrador no cuenta con algún mecanismo para definir cuál de los paquetes debe descartarse y cual debe proseguir [28].

Ahora bien, actualmente existen diferentes técnicas planteadas para que una red logre cubrir los requisitos de QoS de distintas aplicaciones, en especial de aquellas que funcionan en tiempo real [29]. De entre lo propuesto cabe destacar lo presentado por la IETF: por un lado IntServ que se enfoca en brindar QoS a partir de la reserva de recursos (QoS parametrizada) y por otro lado DiffServ que trata sobre la priorización del tráfico (QoS priorizada). En seguida se realiza una descripción de estas técnicas.

2.2.1.2.1 IntServ (Servicios Integrados).

Este es un modelo de múltiples servicios que puede contener diversos requerimientos de QoS, donde una aplicación envía a la red un mensaje de señalización mediante el protocolo RSVP (*Resource Reservation Protocol*) [30], con el cual solicita le sea reservado un conjunto de recursos (ancho de banda y máximo retardo soportado) necesarios para una correcta transmisión, de modo que los datos solo serán enviados una vez la red confirme la solicitud [28] [29].

Desafortunadamente para que este esquema funcione correctamente se necesita que todos los elementos de la red, incluidos los hosts, entiendan perfectamente el protocolo RSVP, lo cual hace que la implementación de este se haga bastante compleja. Además se requiere mantener actualizada la información sobre cada flujo en todos los nodos, con lo cual crea la posibilidad de generar congestión debido al gran número de mensajes que se deben intercambiar entre nodos, de modo que la red se hace poco escalable [28].

2.2.1.2.2 DiffServ (Servicios Diferenciados).

Este modelo se basa en la priorización de clases de tráfico, en el cual cada flujo de datos que ingresa a la red es clasificado y posiblemente condicionado en los extremos de la red, es decir, al igual que en el caso anterior se garantiza la QoS

mediante una reserva de recursos en los nodos intermedios, sin embargo, en esta ocasión dicha reserva es responsabilidad de la administración de la red y por lo tanto no es necesario que las aplicaciones realicen algún tipo de petición, simplemente deberán marcar el tráfico que generen adecuadamente, para que este reciba un tratamiento específico en función de la clase a la que pertenezca [31].

Para este modelo se define una arquitectura denominada dominio Diffserv (ver Figura 2.4) de la cual se pueden identificar dos tipos de equipos de conmutación: los nodos frontera y los nodos interiores [31] [32].

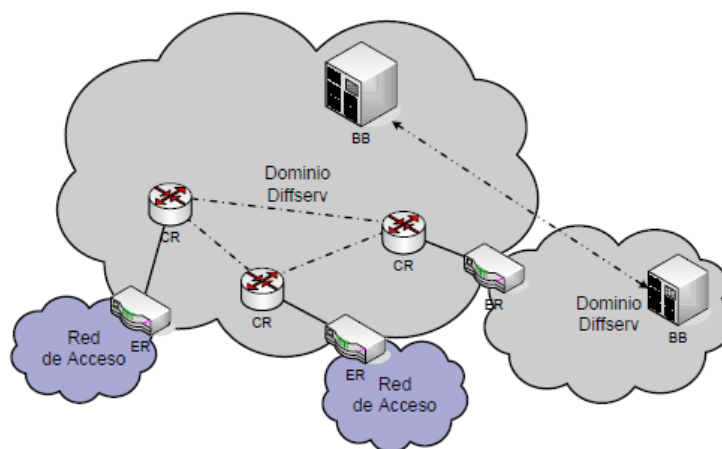


Figura 2.4 Elementos que conforman un dominio DiffServ [32].

- **Nodos Interiores** (CR – *Core Routers*): se trata de los nodos que forman el núcleo de la red, es decir que solo estarán conectados a otros nodos interiores o a un nodo frontera del dominio DiffServ. Entre sus funciones, la más destacada es proporcionar un sistema de encolamiento que permita ofrecer diferentes tratamientos a los agregados de tráfico en función de sus requisitos preestablecidos [28] [32].
- **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 salga o ingrese a un dominio Diffserv cumpla con una serie de requisitos, a esto se le conoce como “Acuerdo Condicional de Tráfico” (“*Traffic Conditioning Agreement*”, TCA) [28] [32].

Ahora bien, para la identificación de los diferentes agregados de tráfico, se reestructura el byte asignado al campo ToS de la cabecera IPv4 (ver Figura 2.5), de modo que se definen nuevas funciones para cada bit. Dentro del modelo DiffServ este byte es identificado como byte DS [28] [31] [32].

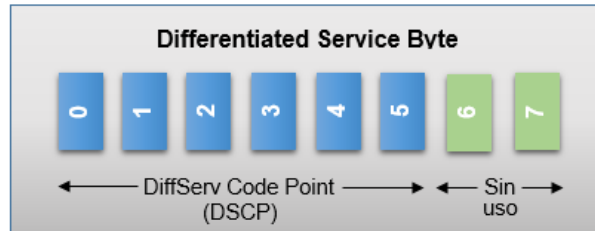


Figura 2.5 Campo de identificación DiffServ – Byte DS [28].

Como puede apreciarse el byte DS se divide en dos campos: los bits 6 y 7 que se han reservado para mantener la compatibilidad con el byte ToS de IPv4 y se denominan “Sin uso” (“*Currently Unused*”, CU). Los bits 0 a 5 se conocen como “Código de servicios diferenciados” (“*Differentiated Services Code Point*”, DSCP), este campo es el que utilizarán los enrutadores pertenecientes al dominio DiffServ para identificar a que clase pertenece cada paquete y por ende el tipo de trato que se le debe aplicar, es decir, se crean grupos de tráfico donde cada cual presenta un comportamiento similar, a estos grupos se les ha denominado “Comportamiento Agregado” (“*Behavior Aggregates*”, BA). Entonces, al interior de la red a cada BA se le asigna un único DSCP a partir del cual se identifica el tratamiento específico o “Comportamiento por salto” (“*Per Hop Behavior*”, PHB) que se debe aplicar sobre el paquete en cuestión [28] [32].

La aplicación de estos perfiles de comportamiento o PHB, en todos los nodos del dominio Diffserv permitirá que los diferentes paquetes de datos reciban más o menos recursos según como hayan sido etiquetados mediante el DSCP [28] [32]. Ahora bien, existen tres perfiles de PHB definidos para el modelo DiffServ:

- **Expedited Forwarding (EF):** se trata de aquellos flujos de tráfico que requieran un Throughput mínimo asegurado, así como un delay limitado y jitter máximo determinado. Este perfil se ajusta a aplicaciones para tráfico en tiempo real y de mayor prioridad, como pueden ser audio/video conferencia, o descarga de video bajo demanda. Este perfil está identificado por el código DSCP: 101110 [28] [32].
- **Asured Forwarding (AF):** este perfil se ha indicado para flujos de tráfico con menos requisitos en comparación a los referidos para EF, ya que no es

posible indicar requisitos temporales para estos flujos (retardo/jitter). En este se define cuatro tipos de clases diferentes en función de los recursos reservados a las mismas. De forma que un nodo Diffserv debe reservar ciertos recursos para el encolamiento adecuado de este tráfico [28] [32].

Dentro de cada clase definida en AF se establecen tres prioridades de descarte. De forma que el perfil AF define un conjunto de 12 posibles servicios. Si se identifica cada servicio con dos subíndices AFxy, la variable “x” representará la clase, mientras que la variable “y” denotará la prioridad de descarte [28] [32].

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 atraviese por el dominio Diffserv [28] [32]. El perfil PHB AF correspondiente se identifica mediante los códigos DSCP descritos en la Tabla 2.1.

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

Tabla 2.1 Códigos DSCP para el perfil AF [28].

- **Best Effort (BE):** aunque no pertenece exclusivamente al modelo Diffserv, este perfil se utiliza para el tráfico que no tiene requisitos de calidad de servicio (caudal garantizado o consideraciones temporales). Este perfil es adecuado para aplicaciones que trabajan en background o que no requieren trabajo en tiempo real, por ejemplo, descarga de ficheros ftp, navegación web, etc [28] [32].

Como ya se ha mencionado, los dispositivos de conmutación en un dominio DiffServ deben cumplir con funciones específicas para brindar las condiciones adecuadas a cada paquete que ingrese a la red, según lo indiquen sus necesidades y los requisitos pactados en el TCA. Cabe mencionar que de las funciones aquí mencionadas las de mayor relevancia son: clasificación, acondicionamiento y encolamiento de datos [28] [31] [32].

- **Clasificación y Acondicionamiento de Tráfico:** Una parte importante de este modelo es la implementación de políticas de clasificación de paquetes,

con las cuales se logra identificar los subconjuntos de tráfico que serán mapeados o condicionados a un BA dentro del dominio DS [28] [32].

Por otro lado, el acondicionamiento del tráfico hace referencia a los procesos de espaciado (shaping), remarcado (remarking), mediciones (metering) y funciones de vigilancia (policing), utilizados para asegurar que se cumpla con las normas establecidas en el TCA [28] [32].

- **Encolamiento:** Esta funcionalidad se encuentra enfocada en mejorar los niveles de delay, jitter y packet drop ocasionados por la congestión de datos al interior de la red. Así pues, los routers pueden emplear dos clases de algoritmos para controlar la red [28] [32]:
 - **Planificador de Cola (Queue Scheduling):** por medio de este se gestiona la cantidad de ancho de banda reservado para cada clase de servicio en un puerto de salida. Así pues, es este quien decide cuándo y qué paquetes se sacan de una cola para pasarlos a una interfaz de salida [28] [32].
 - **Gestor de Memoria de Cola (Queue Memory Management):** En este caso se controla el número de paquetes de una cola (profundidad de la cola), determinando cuándo y qué paquetes se descartan al momento de experimentar congestión de tráfico o incluso antes de esta [28] [32].

Ahora bien, existen diferentes modos para implementar estas funcionalidades, sin embargo, para el presente proyecto es de interés hacer énfasis en aquellos que pueden ser efectuados desde la plataforma Linux, de lo cual se pueden mencionar las herramientas disponibles en el paquete **iproute2**.

Este paquete consta de un conjunto de utilidades para administrar las interfaces de red del sistema, es decir, por medio de estas utilidades se logra la asignación de parámetros de red como: direcciones IP, máscaras o gateways. Adicionalmente, potencia las utilidades de enrutamiento presentes en el kernel de Linux, como por ejemplo la creación de tablas de enrutamiento y reglas específicas para los paquetes de datos que ingresan al sistema [33].

Luego, dentro del paquete iproute2 se encuentra una librería denominada “TC – traffic control”, la cual se usa para implementar control de tráfico en el kernel Linux, en otras palabras, permite crear reglas o políticas para definir un comportamiento específico sobre el flujo de tráfico que transite a través del dispositivo de red [34]. Así

pues, para realizar este procesamiento de tráfico, la librería TC define los siguientes objetos lógicos:

- **Clases:** este objeto permite generar agrupaciones de paquetes a los cuales les corresponde una determinada prioridad y un cierto ancho de banda [34].
- **Colas:** este objeto se encarga de trasladar los paquetes de una determinada clase hacia la tarjeta de red [34].
- **Filtros:** este objeto es el encargado de identificar dentro de cual clase será encolado un determinado paquete [34].

Para el manejo de estos objetos se utilizan los algoritmos denominados “QDISCS”, acrónimo de “Queueing Discipline – disciplinas de encolamiento”. Mediante los cuales se define como serán empleados estos objetos.

Ahora bien, los qdiscs disponibles en la librería TC han sido divididos en dos grupos: las disciplinas con clase y las disciplinas sin clase, estos grupos hacen referencia a aquellas disciplinas de encolamiento que hacen uso del objeto Clase y aquellas que no. Luego, para el contexto del presente proyecto, resultan de mayor interés las qdiscs con clase, ya que son estas las que permiten implementar la clasificación y el acondicionamiento de tráfico requerido por el modelo DiffServ. A continuación se presentan las qdiscs con clase disponibles en la librería TC:

- **PRIO:** Es un contenedor sin capacidad para shaping de un número configurable de clases que se “des encolan” en orden. Esto permite una priorización fácil del tráfico, donde las clases inferiores sólo pueden enviar si las más altas no tienen paquetes disponibles. Para facilitar la configuración, los bits del byte ToS se conservan por defecto [34] [35].
- **CBQ - Class Based Queueing:** Este tipo de encolamiento implementa una rica jerarquía de clases de enlace. Tiene la capacidad para realizar shaping y priorización de paquetes. El modelado se realiza utilizando cálculos de tiempo de inactividad de enlace basados en el tamaño promedio de los paquetes y el ancho de banda subyacente del enlace, esto indica que se requiere conocer el ancho de banda base de la interfaz de salida para realizar las respectivas operaciones de asignación de recursos. Esto aumenta en gran manera la complejidad de implementación de este tipo de algoritmo [34] [35].
- **HTB - Hierarchy Token Bucket:** Implementa una rica jerarquía de clases con énfasis en ajustarse a las prácticas existentes. HTB facilita la garantía de

ancho de banda para las clases, al tiempo que permite la especificación de los límites superiores para compartir entre clases. El modo de operación de esta qdisc se basa en “TBF - Token Bucket Filter” una qdisc sin clase, en la cual se limita el flujo de paquetes a un ancho de banda concreto, aunque también permite pequeñas ráfagas a mayor velocidad. Teniendo en cuenta que no depende de las características de la interfaz y no necesita conocer el ancho de banda disponible en esta, resulta ser más sencillo de implementar [34] [35].

A partir de lo anterior, es claro que existen diversos mecanismos, aplicables sobre la capa IP, para brindar soporte de QoS a una red determinada, sin embargo, para el caso de las redes inalámbricas, es igualmente importante conocer detalles sobre la tecnología de red utilizada y los mecanismos propios que estas emplean para sostener o brindar cierto nivel de QoS; así pues y teniendo en cuenta que la propuesta presentada en este documento se basa en la utilización de las tecnologías WiMAX y WiFi, a continuación se mencionan algunas características de estas tecnologías y como se implementa el soporte de QoS en ellas.

2.2.2 ESTANDAR 802.11 – WIFI

Esta tecnología es en la actualidad la más extendida como red de acceso inalámbrica. Desde que el primer estándar, creado para cubrir redes de área local, viera la luz en 1997, se ha extendido por todo el mundo a un ritmo inimaginable en su nacimiento. Desde un principio ha ofrecido significativas ventajas respecto a las tradicionales redes de acceso cableadas, debido al ahorro derivado del despliegue y mantenimiento de la infraestructura, la posibilidad de operar sobre bandas libres de licencia, el bajo costo de los equipos y un marco de regulación bastante flexible en comparación con otras tecnologías de redes inalámbricas [32]; por este motivo, el avance de la tecnología y la demanda de los usuarios, se han creado diversos grupos de trabajo enfocados en mejorar el estándar. En la Tabla 2.2 se indican algunos de los miembros de la familia 802.11 y sus principales características [18].

Ahora bien, el protocolo IEEE 802.11 es un estándar de comunicaciones del IEEE que define la capa física y de enlace para una transmisión inalámbrica. En este, se definen dos funciones para el acceso al canal [10] [18] [32]:

- **Función de Coordinación Centralizada (PCF – Point Coordination Function):** Es un mecanismo centralizado basado en sondeo, este es opcional y los productos 802.11 no están obligados a implementarlo. En este define un nuevo elemento llamado punto de coordinación (PC – Point

Coordinator), el cual será el responsable de priorizar el acceso al medio de determinadas estaciones y estará situado en el punto de acceso [10] [18] [32].

Estándar	Frecuencia	Modulaciones	Esquemas de transmisión
802.11 a	5 GHz	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	DSSS / OFDM
802.11 b	2,4 GHz	CCK	DSSS
802.11 g	2,4 GHz	CCK, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	DSSS / OFDM
802.11 n	2,4 / 5 GHz	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	MIMO – OFDM
802.11 ac	5 GHz	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	MIMO – OFDM

Tabla 2.2 Extensiones de IEEE 802.11 y sus características [36].

- Función de Coordinación Distribuida (DCF – Distributed Coordination Function):** Se trata de la función básica de acceso al canal, está proporciona un acceso compartido al medio entre dispositivos con la misma capa física mediante el uso de un protocolo basado en Acceso Múltiple con Detección de Portadora (CSMA – Carrier Sense Multiple Access) con evasión de colisiones (CA – Collision Avoidance). Todas las estaciones deben incluir obligatoriamente este mecanismo, a diferencia del mecanismo PCF que es opcional [10] [18] [32].

Aunque se puede decir que PCF es un primer acercamiento hacia el soporte de QoS en redes WiFi, existen diferentes problemas con el mecanismo entre los cuales cabe destacar: retardos impredecibles de las tramas y periodos de transmisión de duración desconocida, en el momento en el cual las estaciones compiten por el medio (a este periodo se le conoce como periodo de contienda). Esto debido a que, al existir diferentes esquemas de modulación y codificación, la duración del envío de mensajes de información, después del sondeo, no está bajo el control del punto de coordinación, lo cual reduce la QoS proporcionada a otras estaciones [10] [18] [32].

De igual forma dentro del estándar no se ha definido ninguna interfaz de gestión de forma que se puedan controlar las operaciones PCF. En consecuencia es imposible configurar una política PCF según los requisitos de protocolos de capas superiores tales como Diffserv o Intserv. De forma que no existe ningún mecanismo para comunicar los requisitos de calidad de servicio de las estaciones al punto de acceso, lo que sería esencial para optimizar el rendimiento del algoritmo PCF en el punto de coordinación [10] [18] [32].

Teniendo en cuenta los inconvenientes mencionados con PCF y dado que los modos tradicionales de 802.11 (a, b, g) no cuentan con un método definido para brindar soporte de QoS, IEEE decide crear un grupo dedicado a estudiar el tema con mayor profundidad [10] [18] [32]. Así pues, surge 802.11e, el cual será presentado a continuación.

2.2.2.1 Provisión de QoS en WiFi

El grupo de trabajo 802.11e define un conjunto de novedades especificadas a la edición de 1999 del estándar IEEE 802.11. Estas mejoras distinguen entre estaciones con soporte de calidad de servicio (QSTA – QoS Enhanced Station) y aquellas que no lo soportan (STA), punto de acceso con soporte de calidad de servicio (QAP) y sin soporte (AP). Dentro de 802.11e se pueden distinguir básicamente dos grupos funcionales. Se trata de las funciones de acceso al canal, y la gestión de especificación de tráfico (TSPEC) [18] [32].

Por un lado, la gestión de especificación de tráfico hace referencia a la gestión de flujos de tráfico definido por el estándar 802.11e, que proporciona un enlace de gestión entre protocolos de QoS de capas superiores, tales como Intserv y/o Diffserv, con las funciones de acceso al canal de 802.11e. Esta especificación describe las características de los flujos de tráfico, como el tamaño de paquetes, el throughput o el retardo. La negociación TSPEC proporciona un mecanismo para el control de la admisión, establecimiento, ajuste, y eliminación de flujos de tráfico [18] [32].

En cuanto a las funciones de acceso al canal, este propone una nueva función llamada Hybrid Coordination Function (HCF) que especifica dos modos de operación siguiendo una idea similar a PCF y DCF [18] [32]:

- **HCCA:** HCF Controlled Channel Access - Acceso a canal controlado HCF, que se basa en un mecanismo de sondeo controlado por el coordinador híbrido (HC – Hybrid Coordinator). Este punto coordinador se encuentra situado junto al QAP. Este se ha diseñado para soportar tráfico parametrizado tal como sucede en IntServ [18] [32].
- **EDCA:** Enhanced Distributed Channel Access - Acceso a canal distribuido mejorado, que consiste en una función de acceso al canal basada en contienda, la cual funciona de forma concurrente junto HCCA. Este se ha dispuesto para soportar priorización de tráfico tal como se hace en DiffServ [18] [32].

Estas funciones de acceso al canal, basan su funcionamiento en un nuevo concepto denominado Oportunidad de Transmisión (TXOP). El TXOP es un intervalo de tiempo acotado en el cual la QSTA está habilitada para transmitir una sucesión de tramas, una vez que esta obtiene el acceso al medio. En DCF, cada vez que una estación ganaba el acceso al medio, le era permitido enviar una única trama. Ahora dependiendo del valor del TXOP se pueden llegar a mejorar los tiempos de transmisión y en algunas situaciones se aumenta throughput total [10] [18] [32].

Ahora bien, teniendo en cuenta las características de una red inalámbrica, podría decirse que HCCA, por soportar su funcionamiento en tráfico parametrizado es una mejor opción, no obstante, al igual que PCF su utilización supone un aumento en la complejidad de la red, lo cual ha llevado a que esta sea poco implementada en la práctica. Así pues, teniendo en cuenta que EDCA ha sido mayormente adoptado e implementado en los dispositivos de red bajo el estándar 802.11 y que su utilización no supone un aumento considerable en la complejidad y coste de operación de la red, es sobre esta que se realizará una profundización en cuanto a modo de operación se refiere [10] [18] [32].

2.2.2.1.1 802.11e – EDCA

Es un mecanismo de acceso que mejora el original DCF para proporcionar soporte de calidad de servicio basado en priorización de tráfico. Dicha priorización se consigue introduciendo cuatro categorías de acceso (AC – Access Category): AC_VO (voz), AC_VI (video), AC_BK (background) y AC_BE (best-effort), las cuales permiten el envío de tráfico asociado a prioridades de usuario [10] [18] [32].

Cada categoría de acceso dispone de su propia cola de transmisión caracterizada por unos determinados parámetros [18] [32]:

- **AIFSN:** Arbitrary Inter-Frame SpaceNumber - Número de Espacio Arbitrario entre Tramas, que corresponde con el intervalo mínimo desde que el medio físico se detecta como vacío hasta que se comienza la transmisión [18] [32].
- **CW:** Contention Window – Ventana de contienda, un número aleatorio, se escoge en el rango comprendido entre CWmin y CWmax, para lanzar el mecanismo de espera (backoff) [18] [32].
- **TXOP:** Limite de oportunidad de transmisión, es la duración máxima durante la cual una QSTA puede transmitir tras haber obtenido el acceso al canal [18] [32].

Configurando apropiadamente estos parámetros es que se consigue la priorización de las distintas clases. A las clases más prioritarias, en general usadas para tráfico en tiempo real, se les asigna: mayor TXOP, menor AIFS y CWmax, comparado con las de menor prioridad. Adicionalmente, se requiere de un punto de coordinación central, en el QAP, para mantener un conjunto común de parámetros en las colas y garantizar así un acceso justo entre las diferentes estaciones que componen la red [10] [18] [32].

Luego, es necesario tener en cuenta que la admisión de un nuevo flujo se debe dar si se cumplen las siguientes dos condiciones [18]:

- Existen suficientes recursos en la red para garantizar los requerimientos de QoS al nuevo flujo [18].
- La QoS de los flujos existentes en la red no se verá degradada con el ingreso del nuevo flujo [18].

Es claro que de no cumplirse estas condiciones la QoS percibida por los usuarios o los dispositivos de red involucrados en la transmisión, se verá afectada desfavorablemente.

En la Figura 2.6 se aprecia el mecanismo de acceso propuesto en 802.11e en comparación con lo realizado en el estándar 802.11 tradicional.

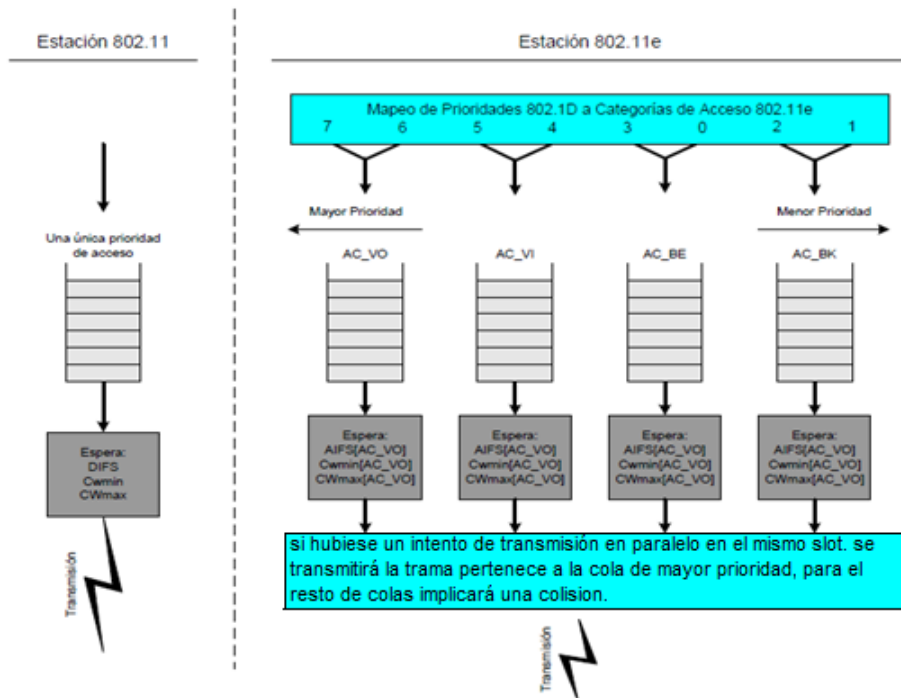


Figura 2.6 Comparación de modelo de funcionamiento en 802.11 y 802.11e [36].

2.2.3 ESTANDAR 802.16 – WIMAX

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax) es el nombre comercial de la tecnología de red de banda ancha inalámbrica que basa su funcionamiento en el estándar IEEE 802.16. Una de sus ventajas es dar servicios de banda ancha en zonas donde el despliegue de otras tecnologías (ej.: fibra óptica), por la baja densidad de población, presenta unos costos por usuario muy elevados (ej.: zonas rurales) [18] [37] [38].

Una gran ventaja de esta tecnología es que puede operar en bandas no licenciadas. Es importante resaltar que el WiMax Forum aún no ha definido un perfil de certificación para equipos que operan en estas frecuencias, por lo tanto, no sería formalmente correcto hablar de equipos WiMax cuando se trabaja en bandas libres. Aclarado este detalle, en este trabajo se hablaría indistintamente de WiMax o del estándar 802.16 [18] [37] [38].

Este estándar fue diseñado para WMAN, en particular se especificaba la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC) [18] [37] [38]. A continuación se presenta un resumen de los aspectos que resultan relevantes para la total comprensión del proyecto.

Se define el funcionamiento en una topología celular bajo la modalidad punto multipunto. En este modo, la arquitectura está conformada principalmente por dos elementos: la estación base (BS) y las estaciones suscriptoras (SS). En una red WiMAX existe una única BS y una o varias SS, donde la BS es la que provee la inteligencia en la red (todas las comunicaciones pasan por la BS y es la encargada de gestionar los recursos) [18] [37] [38].

La comunicación entre las estaciones suscriptoras y la estación base es bidireccional, y la duplexación entre uplink y downlink puede realizarse en frecuencia (Frequency Division Multiplexing o FDD) o en tiempo (Time Division Multiplexing o TDD). Cuando se trabaja en banda libre el método de duplexación especificado en el estándar es TDD [18] [37] [38].

A continuación se procede a señalar algunas de las características más relevantes de este estándar, en cuanto a los beneficios que puede ofrecer en torno al acceso inalámbrico de banda ancha y así mismo, las ventajas frente a otras tecnologías de red inalámbrica similares a este [38].

- Utiliza la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) la que permite la transmisión en distintas frecuencias simultáneamente. Utiliza

espaciamiento ortogonal con lo que se puede garantizar que no exista interferencia entre frecuencias [38].

- Soporta mecanismos de antenas inteligentes (MIMO - *Multiple-Input Multiple-Output*) que mejoran la eficiencia espectral en sistemas inalámbricos y distintos tipos de antenas [38].
- Soporta redes PtMP (Punto a Multipunto) y PtP (Punto a Punto) [38].
- Es capaz de implementar Calidad de Servicio (QoS) para los operadores NLOS sin que la señal se distorsione severamente por la existencia de edificios y otras posibles causas de interferencia [38].
- Como medidas de seguridad, incluyen mecanismos de criptografía y seguridad propios del sistema [38].
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión [38].
- Un sistema que implementa IEEE802.16 (WiMAX) presenta técnicas de modulación adaptativa dependiendo de las condiciones de la relación señal a ruido (SNR) [38].
- Técnicas como FEC (*Forward Error Correction*), codificación convolutiva, y otros algoritmos son usados para poder detectar y corregir errores, tal que ayudan a mejorar la SNR. Se incorpora, además, el ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), para solucionar los errores que no puede solucionar la FEC [38].
- Se implementan algoritmos de control de potencia en las estaciones base de manera que sea posible regular los niveles de potencia en las SS (o CPE), de forma que la potencia recibida por la BS sea ya predeterminada. Con esto se logra un ahorro de la potencia consumida por parte de los CPE's [38].

2.2.3.1 Provisión de QoS en WiMAX

El diseño de las técnicas para brindar soporte de QoS en WiMAX se basa en el estándar del cable modem DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), consiguiendo de esta manera un fuerte control de la QoS utilizando una arquitectura MAC orientada a conexión, en la cual la estación base controla todas las conexión del enlace descendente y el ascendente. Antes de que ocurra cualquiera transmisión de datos, la estación base y la estación suscriptora establecen un enlace lógico unidireccional entre las dos capas llamado conexión [18] [37] [38].

Cada conexión tiene un identificador de conexión (CID), que sirve como una dirección temporal para las transmisiones de datos sobre un enlace particular. Además de conexiones para la transmisión de datos de usuario, la capa MAC de WIMAX define tres conexiones administrativas: las conexiones básicas, las primarias y las secundarias [18] [37] [38].

WiMAX también define un concepto de flujo de servicio que es un flujo unidireccional de paquetes con un conjunto particular de parámetros de QoS e identificado por un SFID (identificador de flujo de servicio). Los parámetros de QoS podrían incluir prioridad de tráfico, tasa máxima de tráfico sostenido, tasa máxima de ráfaga, tasa mínima tolerable, tipo de planificación, tipo de ARQ, retraso máximo, jitter tolerable, tamaño y tipo de unidad de datos, mecanismo a usar para la petición de ancho de banda, reglas para la formación de PDU, etc. El flujo de servicio debe ser aprovisionado por un sistema de administración de red o creado dinámicamente a través de mecanismos de señalización definidos en el estándar [18] [37] [38].

La estación base es responsable de distribuir el SFID y mapearlo a un único CID. Los flujos de servicio pueden ser mapeados también a puntos de código de DiffServ o etiquetas de MPLS (Multiprotocol Label Switching) para permitir QoS extremo a extremo basado en IP. Para soportar una amplia variedad de aplicaciones, WiMAX define los siguientes servicios [18] [37] [38]:

- **UGS: Unsolicited Grant Service - Servicio garantizado no solicitado:** Es un servicio diseñado para soportar un tamaño fijo de paquetes a una tasa constante de datos, está orientado a servicios con requisitos estrictos de temporización como voz sobre IP (VoIP). Los parámetros de flujo de servicio obligatorios que se definen en este servicio son la tasa máxima de tráfico sostenible, la máxima latencia permitida, el jitter tolerado y la política de petición/transmisión. Aquí la estación base programa periódicamente regiones de transmisión de manera regular, de manera anticipada y del tamaño negociado con anterioridad, durante el establecimiento de la conexión sin que haya una petición explícita de parte del usuario con requisitos estrictos de temporización [18] [37] [38].
- **RtPS: Real-time Polling Service - Servicio de consulta en tiempo real:** Este servicio está orientado al tráfico en tiempo real con tasa de transmisión variable, como el video MPEG. Los parámetros de flujo de servicio obligatorios que se definen en este servicio son la tasa mínima de tráfico reservada, la máxima tasa de tráfico sostenible, la máxima latencia permitida y la política de petición/transmisión. A las estaciones con tráfico RtPS se les asigna periódicamente una oportunidad de transmisión para solicitar ancho de banda de manera periódica con el fin de satisfacer sus requisitos en tiempo real [18] [37] [38].
- **NRtPS: Non-Real-Time Polling Service - Servicio de consulta diferido:** Servicio diseñado para soportar flujos de datos tolerantes a retardos y de tamaño variable pero con un ancho de banda mínimo requerido, tal como FTP. Los parámetros obligatorios de flujo de servicio que se definen en este servicio

son la tasa mínima de tráfico reservado, la tasa máxima de tráfico sostenible, la prioridad de tráfico y la política de petición/transmisión [18] [37] [38].

- **BE: Best Effort Service - Servicio de mejor esfuerzo:** En este servicio no se garantiza un nivel mínimo de servicio, ni retardo, ni caudal. Es decir este servicio está diseñado para aplicaciones sin requisitos mínimos de ancho de banda. Los parámetros obligatorios de flujo de servicio definidos en este servicio son la tasa máxima de tráfico sostenible, la prioridad de tráfico y la política de petición/transmisión [18] [37] [38].
- **ERT VR: Extender Real-Time Variable Rate Service - Servicio extendido en tiempo real y tasa variable:** Se diseña este servicio para aplicaciones como VOIP con supresión de silencio, es decir con detección de actividad ya que tienen tasas de datos variables pero necesitan una tasa de datos y un retraso garantizado. Este servicio solo está disponible en el estándar IEEE802.16e y no en el IEEE 802.16- 2004 [18] [37] [38].

En la Figura 2.7 se puede apreciar el proceso de solicitud de conexión realizado entre una SS y una BS en una red WiMAX, con negociación de condiciones para soporte de QoS.

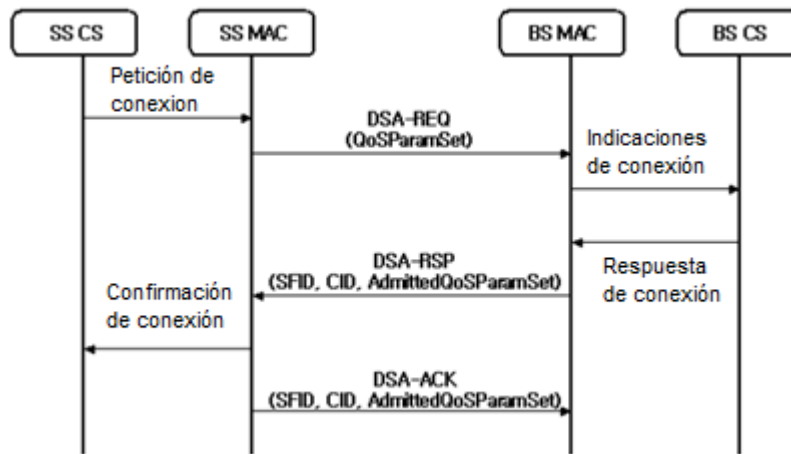


Figura 2.7 Proceso de configuración de conexión en IEEE 802.16 [37].

Como se puede ver, se establece una negociación entre la SS y BS, donde la SS lanza una solicitud de conexión, en la cual se indican los parámetros de QoS requeridos, hacia la BS; esta última envía un mensaje respuesta, en el cual se indican: el código de identificación de la conexión, el código de identificación del servicio y los parámetros de QoS admitidos para dicha conexión. Al recibir esta información la SS responde con un mensaje ACK de confirmación, con lo cual la conexión entre los dos dispositivos queda establecida. Cabe mencionarse que el flujo de eventos, recién descrito, representa un caso de conexión exitosa, donde la BS

efectivamente tenía disponibles los recursos solicitados por la SS, sin embargo, de presentarse el caso en el cual esto no se cumpliera, o se vieran afectadas otras conexiones ya existentes, la BS negará la solicitud de conexión entrante.

Evidentemente los diferentes esfuerzos realizados tanto en WiMAX como en WiFi, en cuanto al soporte de QoS, han derivado en un mejoramiento en cuanto a la percepción de calidad, de los servicios prestados por estas redes, desde la perspectiva del usuario final. Sin embargo, también es claro que brindar soporte de QoS conlleva a un aumento en la complejidad de la red y por ende a un aumento en cuanto a los costos de operación y mantenimiento por parte del proveedor de servicios.

Así pues, una opción que busca mitigar los inconvenientes encontrados en el proceso de brindar soporte de QoS en redes inalámbricas, es la de combinar diferentes tecnologías de red, en este caso WiFi y WiMAX, de modo que se logre aprovechar lo mejor de cada una de estas. Por ende, en la siguiente sección se presentan algunas pautas a tener en cuenta al momento de integrar dos tecnologías de red cuyas características son en gran medida diferentes.

2.2.4 REDES HETEROGENEAS

Una característica de las comunicaciones inalámbricas actuales es que hacen parte de un modelo de comunicación compuesto (ambiente heterogéneo), en el que es común que estén disponibles varios sistemas de acceso inalámbrico, como el celular, el satelital, las redes de área local (WLAN), etc., que pueden combinarse para suministrar un servicio óptimo, todo el tiempo y en todo lugar [39].

Ahora bien, técnicamente una red heterogénea es aquella que ha sido conformada mediante la mezcla de diferentes tipos de tecnologías de red. Así pues, en el contexto de las redes inalámbricas, esto implica que la red estará constituida por dos o más tecnologías de radio y adicionalmente se habla de la coexistencia y la colaboración entre macro celdas y nodos de baja potencia, que operan sin llegar a generar problema alguno [40]. En la Figura 2.8 se puede ver un ejemplo de topología de red heterogénea como la anteriormente descrita.

Uno de los principales temas a abordar en cuanto a la construcción de redes heterogéneas, es el mecanismo de traspaso de red, el cual consiste en el procedimiento elemental para utilizar alternadamente diferentes redes inalámbricas traspasando flujos de tráfico entre puntos de acceso. El traspaso de red es vertical si involucra tecnologías heterogéneas, pero si se realiza entre puntos de acceso de un mismo tipo se denomina horizontal. El objetivo principal de este mecanismo es

garantizar la continuidad de las sesiones de comunicación activas, por lo que el traspaso de flujos debe ejecutarse de forma ininterrumpida [9].

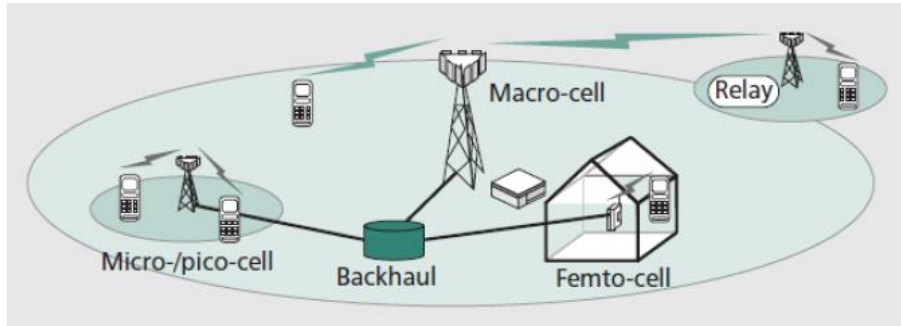


Figura 2.8 Despliegue de red heterogénea para servicio móvil [40].

A través de procedimientos selectivos, el traspaso de red puede aprovechar las características de diferentes redes y dirigir flujos de tráfico hacia aquellas que ofrezcan mejores condiciones de servicio. Un mecanismo de traspaso óptimo debe obtener e interpretar sistemáticamente información sobre el desempeño de la red, las capacidades de las terminales, y los requerimientos de QoS de las aplicaciones [9].

Por otro lado, en cuanto al soporte de QoS, el objetivo es mantener ciertas garantías de servicio aprovechando los mecanismos particulares de QoS de cada tecnología. Generalmente, las arquitecturas propuestas asumen que las redes inalámbricas involucradas en el traspaso de flujos, son capaces de satisfacer requisitos de QoS para diferentes aplicaciones. Por ejemplo, para aplicaciones IP sobre UMTS, la selección de la clase de tráfico y de los valores correspondientes a los atributos de tráfico, se realiza de acuerdo a los parámetros de QoS de Internet. De esta manera, las aplicaciones no usan directamente los servicios de UMTS sino que emplean las definiciones de QoS de Internet y las trasladan a los atributos correspondientes de la tecnología [9]. En otras palabras, se espera que cada segmento de red procese las tramas de información recibidas de acuerdo a su propio método para dar soporte de QoS.

Esto tiene ciertos inconvenientes partiendo del hecho de que se están empleando diferentes tecnologías que emplean distintos protocolos, especialmente en la capa MAC, para realizar la transmisión de tramas de información. Es por esto que en la siguiente sección se explorarán algunos de los inconvenientes que se presentan al momento de plantear e implementar una red heterogénea con soporte de QoS de extremo a extremo.

2.2.4.1 Problemas con la provisión de QoS en redes heterogéneas.

Fundamentalmente el objetivo de una red con soporte de QoS es ofrecer este servicio de extremo a extremo y de manera totalmente transparente para el usuario, es decir, sin importar el número de saltos o las tecnologías de red a través de las cuales deben pasar los paquetes de datos, voz o video de una comunicación, esta no debe verse afectada considerablemente, en especial para las transmisiones en tiempo real sensibles al aumento del retardo, jitter o la pérdida de paquetes.

En el caso de las redes heterogéneas, como ya se ha mencionado, este servicio depende del nivel de QoS que pueda ser alcanzado por cada uno de los segmentos involucrados en la transmisión, lo cual conlleva a que el soporte de QoS ofrecido por este tipo de redes, esté definido por el nivel de QoS que pueda alcanzar el segmento “más débil” en este campo. En efecto, de nada serviría, por ejemplo, parametrizar un conjunto de datos en distintos tipos de tráfico a través de una red WiMAX, si posteriormente estas tramas de información atravesaran un segmento de red WiFi que no entienda dicha clasificación de tráfico, o peor aún, que no de ningún tipo de soporte de QoS, provocando aumentos considerables respecto a retardos, jitter y pérdida de paquetes.

Así pues, de manera similar al funcionamiento de DiffServ, se debe garantizar que todos los dispositivos de la red, entiendan los procedimientos que han sido empleados para cumplir con los requerimientos de QoS de la transmisión en curso y cómo tendrán que actuar en consecuencia a estos. Ahora bien, teniendo en cuenta las estrategias empleadas tanto por WiMAX como por WiFi para dar soporte de QoS, es necesario que esta política de entendimiento entre dispositivos se traslade también hacia las distintas capas de cada tecnología, puesto que implementar un mecanismo de QoS en la capa MAC por sí solo no resultará completamente significativo para la comunicación si en la capa IP no se ha definido un procedimiento que complemente y por lo menos mantenga el nivel de QoS alcanzado en la capa MAC.

En pocas palabras, para lograr un soporte de QoS eficiente, sobre redes heterogéneas, es necesario que exista un método mediante el cual se logre un entendimiento vertical (entre las distintas tecnologías que conforman la red) y uno que permita el entendimiento horizontal (entre las capas de una misma tecnología) de los requisitos de QoS que se deben garantizar para una óptima comunicación.

Ahora bien, dentro de la investigación conceptual y el estado del arte realizados en el presente capítulo, se han explorado algunas propuestas de mecanismos o métodos

de integración de las tecnologías de red WiMAX – WiFi, orientados hacia la creación de una red heterogénea con especial atención en el soporte de QoS.

A partir de lo anterior, en el siguiente capítulo se procede a definir un mecanismo o método que permita la interconexión entre redes WiMAX y WiFi para generar una red heterogénea con soporte de QoS de extremo a extremo.

Capítulo 3

PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN

3.1 PROPUESTA DE INTEGRACIÓN WIMAX – WIFI

Para alcanzar el objetivo planteado en el presente proyecto de grado, se propone la implementación de un mecanismo para la creación de una red heterogénea a partir de las tecnologías de red WiMAX y WiFi, interconectadas entre sí mediante dispositivos de red bajo la plataforma Linux, de la siguiente manera:

Se inicia con lo expuesto en el literal 2.2.4.1, donde se plantea que: para una red heterogénea con soporte de QoS se requiere lograr un entendimiento vertical entre los distintos tipos de redes empleados y un entendimiento horizontal entre las capas de una misma tecnología.

En base a lo anterior, se puede decir que existen dos problemas de fondo para lograr la integración entre WiMAX y WiFi: el primero radica en que, a pesar de ser dos tecnologías de red inalámbrica, los mecanismos de acceso al medio y la propia capa física, en cada caso, son evidentemente diferentes y están diseñadas para operar de maneras distintas, por lo cual un paquete no podrá pasar de manera transparente desde un segmento de red hacia el otro. El segundo problema trata especialmente sobre la gestión de QoS, ya que el mecanismo planteado para brindar QoS en WIFI, es decir, lo establecido en el estándar 802.11e, no es compatible con la gestión de QoS realizada por WiMAX, de modo que, aun cuando los paquetes consiguieran pasar de un segmento de red a otro, todavía se requiere que exista un entendimiento entre los mecanismos para brindar QoS, de tal manera que cada paquete tenga un trato similar o homólogo a través de todos los segmentos de red por los cuales deba transitar.

Así pues, con el fin de lograr enviar paquetes entre segmentos de red WiMAX y segmentos de red WiFi, se propone la implementación de un equipo híbrido, similar a lo planteado en [15], el cual incorpora una interfaz inalámbrica WiFi en un extremo y una interfaz inalámbrica WiMAX en el otro. Esto, empleando una tarjeta de enrutamiento bajo la plataforma Linux, para el segmento WiFi, interconectada a través de Ethernet, a una estación suscriptor (SS), para el segmento WiMAX, tal como se puede apreciar en la Figura 3.1.

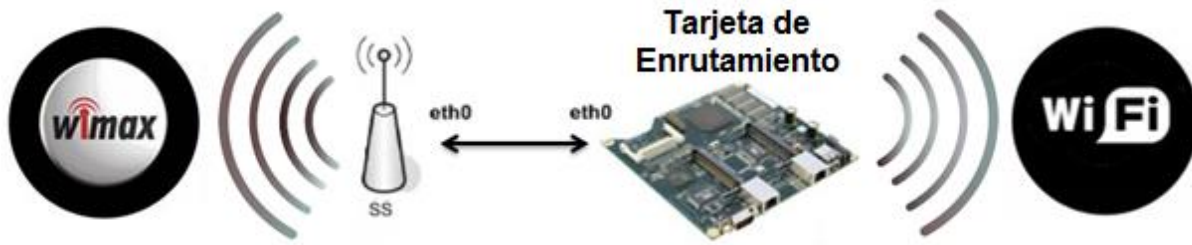


Figura 3.1 Dispositivo híbrido para traspaso de red.

Utilizando esta configuración, se facilita la integración entre los segmentos de red inalámbricos, ya que el paso de datos de un segmento a otro, se hace independiente a la capa física que se esté empleando.

Luego, ya teniendo una configuración para realizar el traspaso de paquetes desde un segmento de red hacia el otro, es decir, un mecanismo para integrar la red a nivel físico, se requiere definir el procedimiento mediante el cual se buscará dar soporte de QoS de extremo a extremo de la misma.

Ahora bien, como ya se ha mencionado, en una red heterogénea el nivel de QoS alcanzado, está definido por lo que pueda lograr el segmento de red con menor fortaleza en este aspecto. En este caso, el segmento débil en cuanto a soporte de QoS es el WiFi y el segmento fuerte es el WiMAX, por este motivo se pretende aprovechar las ventajas que ofrece WiMAX y su servicio de QoS parametrizada.

Así pues, teniendo en cuenta lo visto en el capítulo 2 de este documento, se propone la implementación del modelo de servicios diferenciados DiffServ sobre la capa IP, de manera que sea este la base de la gestión de QoS de la red. De este modo, se define entonces la arquitectura de red (ver Figura 3.2) que será empleada para la construcción de la red heterogénea WiMAX – WiFi.

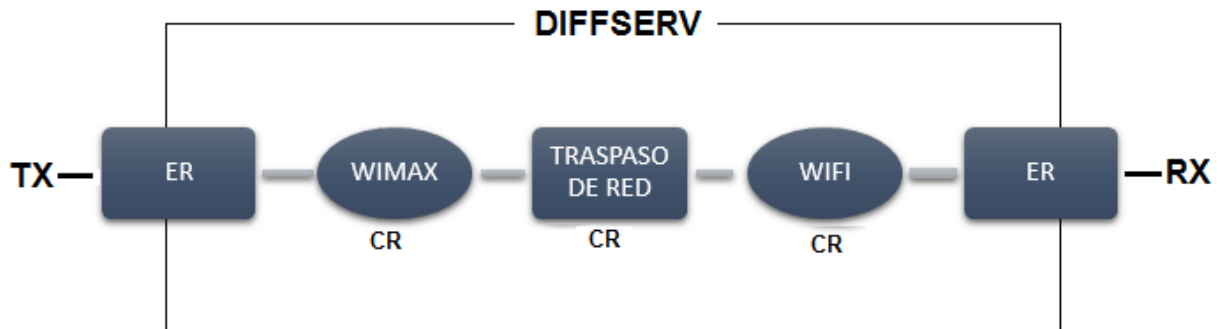


Figura 3.2 Diagrama de arquitectura de red.

Como se puede ver en la Figura 3.2, la red heterogénea estará constituida por un segmento WiMAX y un segmento WiFi, los cuales, cumplirán el rol de nodos interiores (CR) dentro del dominio DiffServ; en los extremos de cada segmento, se contará con dispositivos de red efectuando el rol de nodos de frontera (ER). Finalmente, entre los dos segmentos de red se ubicará el dispositivo híbrido para realizar el traspaso de paquetes entre las dos tecnologías, el cual también ejecutará el rol de nodo interior.

Luego, para realizar la implementación del modelo DiffServ, como gobierno de QoS sobre la red heterogénea planteada, se toman las siguientes consideraciones:

- La gestión de QoS en el segmento WiFi no se lleva a cabo según lo expuesto en el estándar 802.11e, esto con el fin de disminuir la complejidad de la integración entre las dos tecnologías, al no incluir configuraciones sobre la capa MAC. En su lugar se utilizarán las herramientas dispuestas en Linux, específicamente la librería TC del paquete iproute2, para realizar la adecuación del tráfico de acuerdo a las funciones de un nodo interior dentro de un dominio DiffServ.
- El segmento WiMAX, es decir, la estación base que gestione las conexiones en este segmento, debe estar debidamente configurada, para que, al igual que en el segmento WiFi, se cumpla con las responsabilidades inherentes a un nodo interior dentro del dominio DiffServ.

Así pues, teniendo en cuenta las disposiciones mencionadas para la gestión de QoS, se procede a definir el comportamiento, a nivel IP, del dispositivo híbrido para el traspaso de red tal como se aprecia en la siguiente figura.

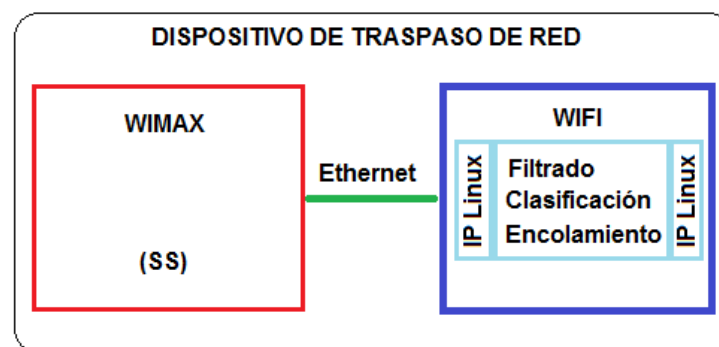


Figura 3.3 Diagrama en bloques del dispositivo híbrido para el traspaso de red.

Como se puede ver en la Figura 3.3, sobre el componente wimax del dispositivo híbrido para traspaso de red, es decir la SS, no se realiza ninguna configuración

especial para la gestión de QoS, puesto que según lo estipulado por el estándar 802.16, este proceso se debe llevar a cabo sobre la BS, de modo que, en cuanto a QoS se refiere, la responsabilidad de la SS recae simplemente en comunicar a la BS la clase a la cual pertenece cada paquete.

En cuanto al componente wifi, como se puede apreciar, toda la gestión de los flujos de datos se realiza mediante el empleo de las herramientas de control de tráfico, dispuestas en Linux, para llevar a cabo las labores de adecuación (filtrado y clasificación) y control (encolamiento) de tráfico.

Ahora bien, teniendo en cuenta que se utilizará el mecanismo propio de WiMAX para brindar QoS y en simultáneo se hará uso de lo definido por el modelo DiffServ, se requiere la especificación de un medio por el cual estos dos mecanismos se comuniquen acerca de cuál debe ser el trato para cada paquete. Entonces, teniendo en cuenta que ambos mecanismos basan el soporte de QoS en la clasificación y priorización del tráfico, se plantea una homologación de clases de tráfico entre las tecnologías involucradas. Esta homologación es presentada a continuación en la Tabla 3.1.

Tráfico WiMAX	Tráfico WiFi	Tráfico DiffServ	Homologación
UGS	AC_VO	EF	H_VO
RTPS	AC_VI	AF4x	H_VI
NRTPS	AC_BK	AF2x	H_BK
BE	AC_BE	BE	H_BE

Tabla 3.1 Tabla de Homologación de clases de tráfico.

Para la realización de la homologación de clases de tráfico presentada en la Tabla 3.1, se han tenido en cuenta las definiciones de cada clase de tráfico, presentadas en el capítulo 2 del presente documento, específicamente el literal 2.2.1.2.2 para las clases de tráfico en DiffServ y el literal 2.2.3.1 para las clases de tráfico en WiMAX. Cabe mencionar que, aunque se presentan las clases de tráfico definidas para WiFi (literal 2.2.2.1.1) estas solo se muestran a modo de referencia, pues como ya se ha mencionado sobre este segmento tan solo se hará empleo de lo planteado en el modelo DiffServ.

Ahora bien, tal como se encuentra definido en el modelo DiffServ, para identificar a cual clase pertenece cada paquete, se hace uso del DSCP al interior del byte ToS en la cabecera IP. Lo que se busca es definir un mismo valor para identificar las clases de tráfico homologas, es decir que el DSCP para identificar, por ejemplo, la clase UGS en el segmento WiMAX será el mismo DSCP para identificar la clase EF sobre el modelo DiffServ en el segmento WiFi, de esta manera se pretende conservar el

nivel de prioridad de cada paquete a través de los diferentes segmentos de red. Luego, es responsabilidad de los nodos de frontera realizar la respectiva asignación del DSCP a cada paquete que ingrese a la red, de tal manera que todos los nodos interiores logren identificar la clase y por tanto la prioridad que se debe utilizar.

Así pues, se ha presentado la propuesta de integración WiMAX – WiFi, en la cual se incluye la generación de una red heterogénea, gobernada mediante el modelo de servicios diferenciados para realizar la gestión de QoS, la cual utiliza un dispositivo híbrido para realizar el traspaso de red. A continuación se muestra la implementación de la propuesta realizada.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DE PROPUESTA DE INTEGRACIÓN WIMAX – WIFI

En base a la arquitectura de red propuesta en el apartado inmediatamente anterior, se diseña un diagrama en bloques del sistema (ver Figura 3.4), con el fin de identificar, con una mayor facilidad, los dispositivos que componen cada segmento de red, así como las configuraciones que se deben realizar para que cada uno de estos cumplan con las funciones estipuladas para del modelo de gestión de QoS seleccionado, es decir, para el modelo DiffServ.



Figura 3.4 Diagrama en bloques de la implementación propuesta.

Entonces, cada uno de los bloques que se ven en la Figura 3.4, representa un nodo en la estructura física de la red. Así mismo, cada bloque indica el rol o la función que debe cumplir cada dispositivo dentro del modelo de DiffServ para realizar la correspondiente gestión de tráfico.

A continuación se realiza una descripción de los dispositivos empleados en cada bloque para realizar el montaje de la red.

3.2.1 MONTAJE DE LA RED

3.2.1.1 Bloque ER.

Este bloque está conformado por una system board de referencia alix2D2, cuyas características se especifican en la Tabla 3.2.

CPU	500 MHz AMD Geode LX800 CPU cache = 64KB instrucciones + 64KB datos + 128KB -L2 crypto acelerador integrado
Memoria	256MB DDR DRAM chip de memoria en placa
Almacenamiento	Compact Flash socket
MiniPCI Slot	Dos MiniPCI Type IIIA/IIIB slots
Software soportado	FreeBSD, Linux, NetBSD, OpenBSD, RouterOS, IkarusOS, Windows XP
Chipset	Atheros AR5414
Radios	Mikrotik R52 Mini-PCI

Tabla 3.2 Especificaciones placa Alix 2D2.

Para el contexto del presente proyecto, este dispositivo se emplea en la red como una tarjeta de enrutamiento, la cual empleará dos interfaces Ethernet, una para comunicarse con el bloque WIMAX y la otra para recibir el tráfico que pretende ingresar a la red, o bien para dar salida a aquellos flujos que tienen como destino un punto exterior a esta.

3.2.1.2 Bloque WIMAX.

Este bloque está constituido por una estación base del fabricante *Albentia Systems*, de fácil configuración a través de su respectiva interfaz web, para la cual se cuenta con un detallado manual de usuario proporcionado directamente por el fabricante. En la Tabla 3.3 se pueden apreciar algunas características del equipo mencionado.

Equipos WiMAX	Características
Estación Base – BS	Estación base WiMAX ARBA550 BS Series, operando en la banda no licenciada ETSI/FCC de 5 GHz, basada en el estándar IEEE 802.16-2009.

Tabla 3.3 Detalle de BS WiMAX.

En este caso se emplea una interfaz Ethernet para realizar la comunicación hacia el bloque ER y la respectiva interfaz inalámbrica, en modo de punto de acceso, para conectarse a la SS.

3.2.1.3 Bloque WIMAX/WIFI.

Este bloque está compuesto por lo que se ha definido como dispositivo híbrido de traspaso de red, el cual consta de una estación suscriptor, del fabricante *Albentia*

Systems (ver Tabla 3.4) para el segmento WiMAX y una tarjeta de enrutamiento Alix 2D2 (ver Tabla 3.2) para el segmento WiFi.

Equipos WiMAX	Características
Estación Suscriptora – SS	Estación suscriptora ARBA500 compatible con estación base ARBA550.

Tabla 3.4 Detalle de SS WiMAX.

Tal como se indica en el literal 3.1, la SS emplea su interfaz inalámbrica para comunicarse con la BS, estableciendo de esta manera el segmento WiMAX de la red y una interfaz Ethernet para conectarse a la tarjeta de enrutamiento; Esta última, obviamente, también emplea Ethernet para realizar la comunicación con la SS y adicionalmente utiliza una interfaz inalámbrica para establecer un enlace WiFi.

3.2.1.4 Bloque WIFI/ER.

Este bloque, al igual que el bloque ER, está conformado por una tarjeta de enrutamiento de referencia alix2D2 (ver Tabla 3.2), no obstante, en esta ocasión se utiliza una interfaz inalámbrica para establecer conexión con el dispositivo híbrido de traspaso de red, conformando de esta manera el segmento WiFi. Adicionalmente se utiliza una interfaz Ethernet para dar salida a los paquetes de datos que han transitado en la red y tienen como destino un punto al exterior de esta, o bien para recibir aquellos flujos que pretenden ingresar.

3.2.1.5 Maqueta de red.

Finalmente, al tener claridad sobre los dispositivos empleados, se procede a realizar el montaje físico de la red, el cual puede apreciarse en la Figura 3.5.

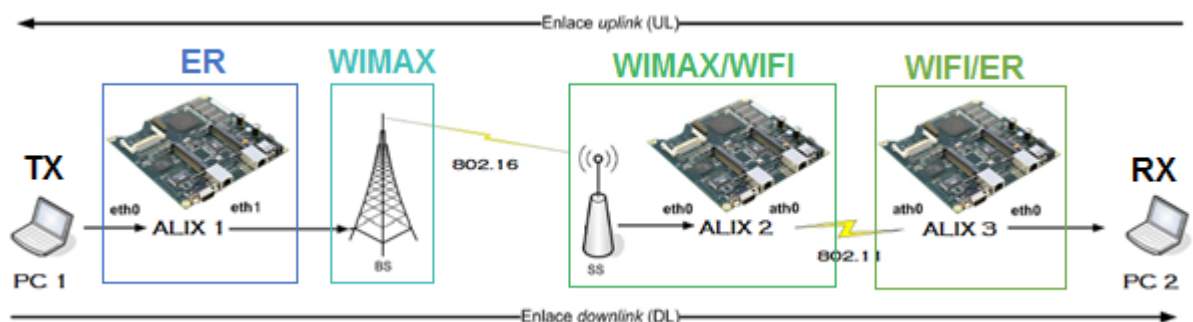


Figura 3.5 Montaje físico de la propuesta de integración WiMAX - WiFi.

En la figura anterior, se aprecia claramente la distribución de cada uno de los bloques que componen la propuesta de integración, al interior de la red planteada. Así mismo, se aprecia la inclusión de dos equipos: PC1 y PC2, uno en cada extremo de la red, los cuales serán empleados como dispositivos de transmisión y recepción de los flujos de datos generados para llevar a cabo las pruebas de validación de la propuesta de integración. Las especificaciones de estos equipos se detallan en la Tabla 3.5.

Equipo	Detalle
Sobre mesa	Computador con procesador Intel Core 2 Duo 3 GHz, DD: 80 GB, Memoria RAM 4 GB, bajo el sistema operativo Ubuntu 12.04
Portátil	Computador portátil con procesador Intel Core i3 2.27 GHz, DD: 320 GB, Memoria RAM 3 GB, bajo el sistema operativo Ubuntu 12.04

Tabla 3.5 Especificaciones equipos PC.

Adicionalmente, de la Figura 3.5, se obtiene la direccionalidad de los enlaces, de modo que: el sentido downlink, hace referencia a una transmisión generada desde el PC1, dirigida hacia el PC2; para el sentido uplink se tendrá el caso contrario, es decir de PC2 hacia PC1.

A continuación se realiza la descripción de las configuraciones requeridas, sobre cada bloque, para concluir la implementación de la propuesta de integración planteada.

3.2.2 CONFIGURACIÓN DE LA RED

3.2.2.1 Bloque ER – ALIX1

Dentro de la arquitectura planteada, a este bloque le corresponde el rol de nodo de frontera, por lo cual la tarjeta de enrutamiento debe realizar un control de admisión sobre los paquetes que ingresen a la red a través del filtrado, el encolamiento y la clasificación de cada uno de estos.

Para lograr lo anterior, se instala sobre la tarjeta el sistema operativo **Voyage 0.6.5** (ver anexo 1), el cual dispone del paquete `iproute2` ya preinstalado. Entonces, la implementación de las funcionalidades, requeridas por este bloque, se realiza de la siguiente manera:

- **Clasificación de paquetes:** Como ya se ha mencionado, este procedimiento se realiza mediante la asignación de un DSCP a cada paquete, esto se logra a través del empleo de la herramienta **IPTables** (disponible directamente desde

el kernel de Linux), la cual permite modificar el contenido de la cabecera IP de cada paquete.

Luego, de acuerdo a lo planteado en la propuesta de integración, se debe seleccionar un mismo valor del DSCP para identificar las clases de tráfico homologas en la red, para lo cual se ha tenido en cuenta lo mencionado en [32] en cuanto a la asignación de los códigos de acuerdo a la prioridad que se desea manejar. Así pues, en la Tabla 3.6 se muestran los DSCP definidos para identificar las clases de tráfico planteadas en la propuesta de integración.

TOS	DSCP	Clase de tráfico
0xb8	0x2e	H_VO
0xa0	0x28	H_VI
0x20	0x08	H_BK
0x00	0x00	H_BE

Tabla 3.6 Mapeo de códigos TOS/DSCP a clases de tráfico homologadas.

- **Filtrado:** El objetivo de este procedimiento es realizar un control de admisión sobre los paquetes que pretendan ingresar a la red, de modo que aquellos pertenecientes a una clase de tráfico con una asignación de mayor prioridad, sean transferidos, a la respectiva interfaz de salida, lo más rápido posible.

Luego, la librería TC posibilita la implementación de dos clases de filtros: el route, enfocado a identificar paquetes de acuerdo al direccionamiento IP y el filtro u32 [33], el cual tiene la capacidad de leer varios de los campos de la cabecera IP de cada paquete. Es por esto que será este último el utilizado para llevar a cabo las labores de filtrado en el bloque ER. Cabe mencionar que para este caso en concreto, el filtro procederá según el valor DSCP asignado.

- **Encolamiento:** Con este mecanismo se busca mejorar la gestión del ancho de banda disponible para la transmisión de paquetes, de modo que se reduzca en lo posible los efectos de un cuello de botella, como lo pueden ser un aumento desmedido en el retardo y la pérdida de paquetes.

Ahora bien, teniendo en cuenta lo visto en el literal 2.2.1.2.2 del presente documento, son varios los tipos de encolamiento que pueden ser implementados en un entorno Linux, no obstante, para el contexto de este proyecto, es de interés hacer uso de los algoritmos de encolamiento denominados colas con clase, de los cuales se ha decidido emplear HTB,

puesto que su implementación no representa un aumento considerable en la complejidad de la red en comparación a los demás algoritmos de encolamiento vistos [35].

Así pues, mediante el empleo de HTB se logra repartir el ancho de banda disponible entre las clases de tráfico definidas, esto ya que permite definir un umbral mínimo y uno máximo para cada clase configurada, de modo que cada clase obtendrá al menos un mínimo del servicio que ha solicitado. Cuando una clase solicita menos de la cantidad asignada, el restante (el exceso) de ancho de banda se distribuye a otras clases que soliciten el servicio [35].

Luego, es claro que durante ciertas transmisiones se pueden presentar varios paquetes pertenecientes a una misma clase, por lo cual podría presentarse congestión en la red dado el servicio implementado. Para evitar esto, la herramienta "tc" brinda la posibilidad de configurar colas internas a cada clase definida en HTB, aunque por defecto estas son PFIFO (Packet, First-in, First-out), se ha decidido utilizar SFQ (Stochastic Fairness Queueing), puesto que esta permite mantener varias micro-colas de tipo FIFO (First-in, First-out) con una distribución bastante equitativa del ancho de banda disponible entre estas [35].

Ya teniendo claro el tipo de encolamiento que será utilizado en el presente bloque, se procede a presentar el árbol de decisión planteado para la implementación de HTB, el cual ha sido diseñado teniendo en cuenta las clases de tráfico definidas para este proyecto, tal como se puede ver en la Figura 3.6.

Así pues, se ha definido una clase raíz bajo la cabecera root de HTB con el objetivo de poder repartir los recursos disponibles entre las ramificaciones con exigencias de QoS y la ramificación sin requisitos de QoS, en otras palabras, se divide el flujo en dos, una parte para la clase de menor prioridad, clase H_BE, y otra para las clases de mayor prioridad: H_BK, H_VI y H_VO.

Luego, para hacer la asignación de recursos disponibles en la red, para cada clase definida, primero se debe realizar un dimensionamiento que establezca el ancho de banda con el cual se cuenta para efectuar las transmisiones en el sistema. Este cálculo se realiza mediante la herramienta **iperf** (ver anexo 2) [43] con la cual se logra identificar que: el enlace establecido para comunicar el PC1 con el PC2, a través de la red implementada, cuenta con un ancho de banda de 5.5 Mbps.

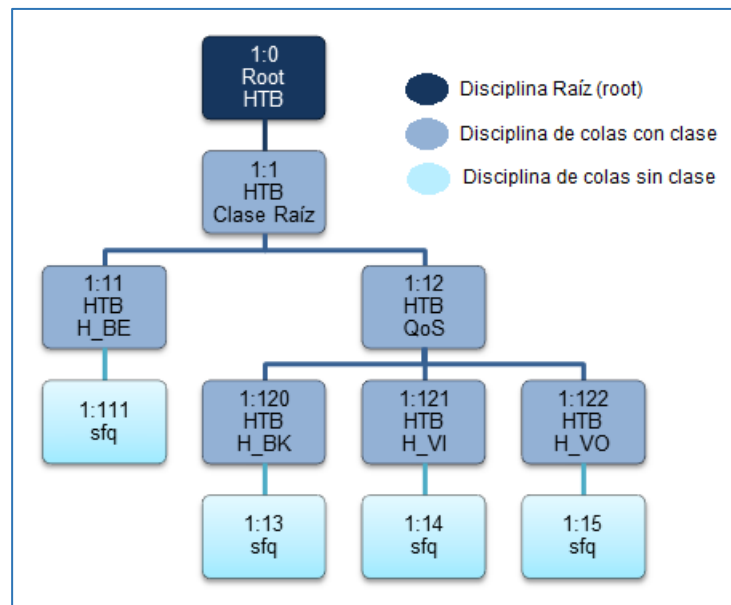


Figura 3.6 Jerarquía de clases para disciplina de colas HTB.

A partir de este dato se procede a realizar la asignación del ancho de banda disponible, tal como puede observarse en la Tabla 3.7.

Clase de tráfico	Min rate (kbps)	Max rate (kbps)
H_VO	2000	4000
H_VI	1500	3000
H_BK	1000	2000
H_BE	1000	3000

Tabla 3.7 Asignación de caudal para cada tipo de tráfico en cola HTB.

Esta asignación presentada, se realiza mediante la modificación de los parámetros **rate** (ancho de banda asegurado) y **ceil** (máximo ancho de banda alcanzable), presentes en la línea de comando utilizada para generar la cola HTB, tal como se observa en el siguiente ejemplo.

```
6 # tc class add dev ath0 parent 1: classid 1:1 htb rate 2000kbit ceil 4000kbit
```

Es preciso aclarar que la asignación presentada, ha sido realizada para este proyecto en específico y por tanto, para un caso de operación real, se deben tomar en cuenta las medidas de ancho de banda del sistema en cuestión, así como los requerimientos de los usuarios.

Finalmente, es de vital importancia tener en cuenta la direccionalidad del enlace, ya que: la clasificación, el filtrado y el encolamiento de paquetes, se pueden configurar sobre cualquiera de las interfaces de red de la tarjeta, discriminando si los paquetes

se encuentran ingresando (ingress) o saliendo (egress) de esta. Entonces, con base en el rol establecido para este bloque, se realizan las respectivas configuraciones de la tarjeta de enrutamiento tal como se muestra en la Tabla 3.8.

Configuración ALIX1			
eth0		eth1	
Ingress	egress	ingress	egress
iptables, filtro u32	colas HTB	filtro u32	colas HTB

Tabla 3.8 Resumen de configuraciones en Bloque ER.

Así pues, al realizar una transmisión en sentido downlink, los paquetes ingresarán por la interfaz eth0 de la tarjeta de enrutamiento, donde serán clasificados por medio de las iptables y se les dará prioridad de paso a aquellos que pertenezcan a la clase de mayor prioridad a través del filtro u32. Finalmente, los paquetes se dispondrán a salir por la interfaz eth1, en orden de prioridad y manteniendo los límites establecidos en la cola HTB. Para una transmisión en sentido uplink, no se requiere la utilización de iptables, ya que en este punto los paquetes ya deben tener la debida asignación del DSCP.

Por último, se debe destacar que todas las configuraciones planteadas en esta sección, sobre la tarjeta de enrutamiento, se han condensado en un Shell-script de tipo SH (ver anexo 3), de manera que tan solo será necesario ejecutar dicho script para dejar la tarjeta de enrutamiento debidamente configurada.

3.2.2.2 Bloque WIMAX – BS

Como ya se ha definido, este bloque cumple el rol de nodo interior sobre el dominio DiffServ, sin embargo para cumplir con las funcionalidades de este rol, basta con realizar las respectivas configuraciones de gestión de flujos de datos sobre la BS seleccionada, pues la intención es aprovechar las ventajas del mecanismo de gestión de QoS propio de WiMAX.

Así pues, la consola web de la BS dispuesta por el fabricante permite realizar varias configuraciones que influyen sobre el funcionamiento de la BS. En la Figura 3.7 se logra apreciar la interfaz gráfica a través de la cual se realizan las configuraciones de ajuste de flujo mencionadas, sin embargo, para cada una de las clases de tráfico definidas para este proyecto, tan solo serán modificadas las siguientes opciones:

- **QoS Type:** Mediante el cual se indica a cual tipo de servicio, dentro de los definidos para WiMAX, serán aplicadas las condiciones allí definidas [41]. Cabe aclarar, que los valores seleccionados para marcar el byte ToS de cada

paquete en los nodos de frontera, son plenamente reconocibles por la BS. Entonces, por ejemplo, cuando la BS recibe un paquete con el DSCP 0x2E, este será tratado bajo las condiciones que se configuren para los flujos de tipo UGS.

- **Max Rate:** Permite indicar un límite máximo a la velocidad de transmisión del flujo en cuestión. Este parámetro se fija en kbps [41].
- **Min Rate:** Por el cual se fija la tasa mínima que será reservada y por tanto garantizada para cada flujo debidamente configurado [41].
- **Max Jitter:** Este parámetro permite indicar cuál será la máxima tolerancia a la variación del retardo soportada por el flujo [41].
- **Max Latency:** Por medio de este parámetro se 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 mismo a su interfaz RF [41].

The screenshot shows the Alentia Systems web console interface for configuring data flows in BS ARBA550. The interface includes a sidebar with navigation options (System, WIMAX, Provisioning, Local AA, CA Certs, Connectivity) and a main content area titled "Flow Description". The main area displays a "Flow Descriptor" table with parameters and values, and two additional tables for "QoS Parameters" and "ARQ Parameters".

Parameter	Value
Alias	Video Tx
Direction	<input checked="" type="radio"/> Tx (DL) - <input type="radio"/> Rx (UL)
CRC	<input checked="" type="checkbox"/>
Fragmentation	<input checked="" type="checkbox"/>
PiggyBack BWRReq	<input checked="" type="checkbox"/>
Broadcast BWRReq	<input checked="" type="checkbox"/>
Multicast BWRReq	<input type="checkbox"/>
SDU Size	0
Long FSN Size	<input checked="" type="checkbox"/>
CSL Type	CS IPv4 over Ethernet

Parameter	Value
QoS Type	BE
QoS Prio	0
Max Rate (Kbps)	4000
Min Rate (Kbps)	0
Max Burst (bytes)	0
Max Jitter (ms)	0
Max Latency (ms)	0
Grant Interval (ms)	0
Polling Interval (ms)	0

Parameter	Value
ARQ Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>
Window Size (bytes)	1024
Block LifeTime (ms)	855
Retry TO (ms)	218
Sync Loss TO (ms)	0
Purge TO (ms)	498
Block Size	Default

Figura 3.7 Consola web para configuración de flujos de datos en BS ARBA550 [41].

El valor asignado para cada uno de estos parámetros será seleccionado de acuerdo a lo mencionado en las recomendaciones Y.1540 y Y.1541 de la ITU [42], en relación a los lineamientos que pueden ser usados para evaluar la calidad de funcionamiento en cuanto a velocidad, precisión, fiabilidad y disponibilidad en la transferencia de paquetes a través del protocolo IP. En la Tabla 3.9 se puede encontrar un resumen de los valores seleccionados para cada clase de tráfico definida.

Clase de tráfico	Clase ITU	Delay	Jitter
H_VO	0	100 ms	50 ms
H_VI	1	400 ms	50 ms
H_BK	4	1 s	Sin requerimiento
H_BE	5	Sin requerimiento	Sin requerimiento

Tabla 3.9 Parámetros de QoS en una red IP [42].

En cuanto a los valores que serán asignados a los parámetros de velocidad de transmisión (Max rate, Min rate), se tiene que para el segmento WiMAX se cuenta con un ancho de banda de 10,5 Mbps, los cuales serán divididos tal como se muestra en la Tabla 3.10.

Clase de tráfico	Min rate (kbps)	Max rate (kbps)
H_VO	3500	4000
H_VI	3000	3500
H_BK	2000	2500
H_BE	2000	3000

Tabla 3.10 Asignación de caudal por tipo de tráfico en la BS WiMAX.

3.2.2.3 Bloque WIMAX/WIFI – SS/ALIX2

El rol que desempeña este bloque dentro del modelo DiffServ es el de nodo interior, por lo cual su principal función es la de llevar a cabo la gestión del tráfico por medio del encolamiento y filtrado, de tal manera que se brinde un trato diferenciado a cada paquete de acuerdo a la clase de tráfico a la cual pertenezca.

Luego, ya se ha dejado en claro que desde el componente WiMAX, es decir la SS, no se realizará una configuración más allá de una debida asignación de direccionamiento IP.

Por otro lado, para el componente WiFi, inicialmente se debe realizar la configuración de la interfaz inalámbrica, para llevar a cabo este proceso se adiciona el driver MadWiFi, el cual permite realizar configuraciones avanzadas sobre los puertos inalámbricos de las tarjetas, especialmente en cuanto a los modos de operación: Monitor, Acces Point, estación y maestro.

Luego, para este caso, se configura el radio de la tarjeta de enrutamiento para operar en modo Acces Point, de tal manera que el dispositivo híbrido para el traspaso de red pueda operar bajo la topología de red punto multi punto, esto con el fin de aprovechar las ventajas de conexión de este tipo de redes inalámbricas.

Finalmente y en busca de una correcta gestión de QoS, se debe asegurar el cumplimiento de las funcionalidades requeridas por el modelo DiffServ. Así pues, tal como se han descrito en el literal 3.2.2.1, para el bloque ER, se realizan las configuraciones sobre la tarjeta de enrutamiento de la siguiente manera:

Configuración ALIX2			
eth0		ath0	
Ingress	Egress	ingress	Egress
filtro u32	colas HTB	filtro u32	colas HTB

Tabla 3.11 Resumen de configuraciones en Bloque WIMAX/WIFI.

Como se puede apreciar, en este caso tanto para las transmisiones en sentido downlink, como para las transmisiones en sentido uplink, lo único que se lleva a cabo es la gestión de los paquetes, de acuerdo a la prioridad asignada a la clase de tráfico a la cual pertenecen, esto a través de la aplicación del encolamiento y el filtrado.

3.2.2.4 Bloque WIFI/ER – ALIX3

Este bloque es muy similar al bloque ER, puesto que también desempeña el rol de nodo de frontera, sin embargo, la diferencia radica en que: para esta ocasión se cuenta con una interfaz Ethernet y una interfaz inalámbrica, razón por la cual sobre esta tarjeta también se instala el driver MadWiFi.

En cuanto a las configuraciones para la gestión de tráfico, estas se realizan siguiendo el patrón que ya se ha descrito en el literal 3.2.2.1. En la Tabla 3.12 se pueden ver cómo han sido establecidas.

Configuración ALIX3			
eth0		ath0	
Ingress	egress	Ingress	egress
iptables, filtro u32	colas HTB	filtro u32	colas HTB

Tabla 3.12 Resumen de configuraciones en Bloque WIFI/ER.

Así pues, al tratarse de un nodo de frontera, es claro que para las transmisiones en sentido uplink, se requiere de asegurar la correcta asignación del DSCP a cada paquete, por medio de las iptables.

Capítulo 4

VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

4.1 ESCENARIO DE PRUEBAS

Para la realización de las pruebas de validación del mecanismo de integración propuesto, tal como se pudo apreciar en el capítulo 3 del presente documento, se ha realizado un montaje de laboratorio, el cual, debido a que en la universidad del Cauca no se cuenta específicamente con los dispositivos WiMAX, se realiza en colaboración con el laboratorio de telecomunicaciones de la universidad Rey Juan Carlos en Madrid España. Por este motivo, se ha dispuesto de un enlace para comunicar las universidades, empleando direccionamiento IP real, de tal manera que los dispositivos que componen la red, puedan ser manipulados de manera remota.

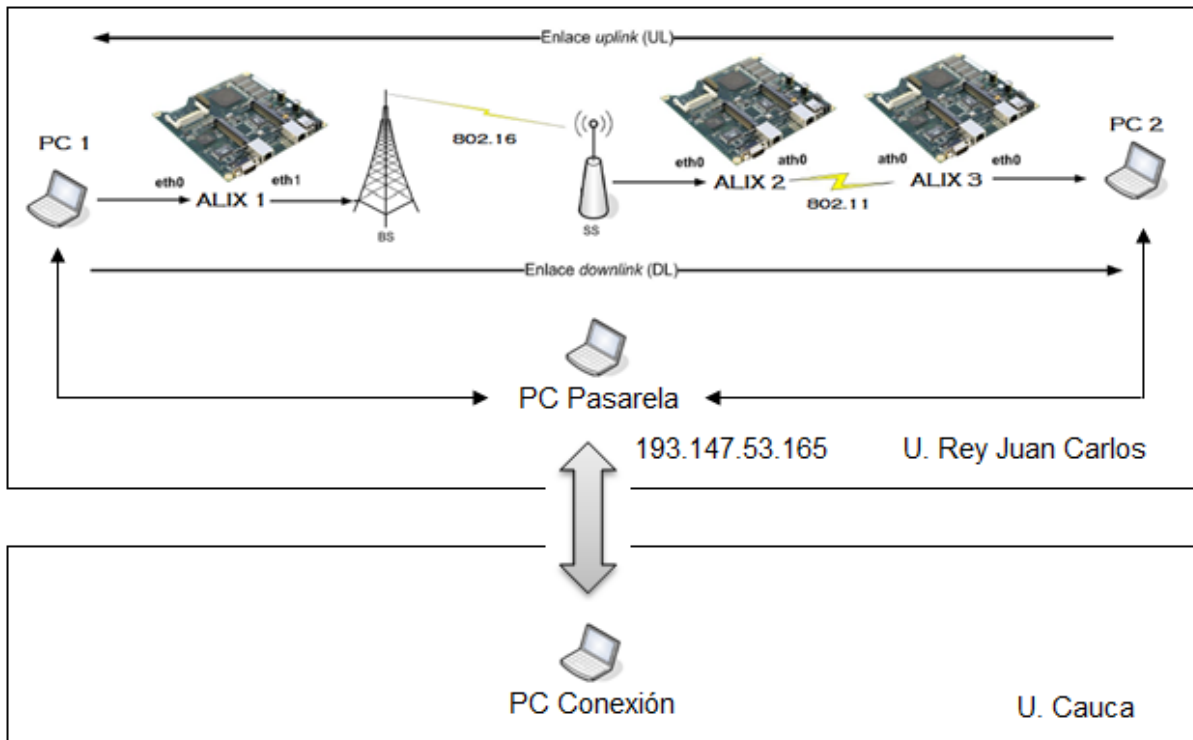


Figura 4.1 Ambiente de pruebas.

En la Figura 4.1 se observa el montaje realizado para establecer el ambiente de pruebas, donde a la maqueta de red ya establecida (ver literal 3.2.1.5) se le adicionan dos enlaces Ethernet, uno en cada extremo, hacia un equipo que se ha

denominado PC Pasarela, el cual cumple con dos funciones específicas: en primer lugar, permitir la comunicación en remoto desde el laboratorio en la URJC hacia el equipo PC Conexión en la universidad del Cauca. La segunda función que se le encarga a este equipo, es la de almacenar los resultados de las pruebas que se realizaran sobre la maqueta propuesta, de modo que toda la información resultante pueda ser trasladada posteriormente hacia el equipo PC Conexión en la universidad del Cauca, para realizar el posterior proceso de análisis.

Luego, cabe destacarse que la comunicación se realiza mediante protocolo SSH (Secure Shell – intérprete seguro), por este motivo y con el objetivo de establecer plena comunicación entre todos los dispositivos involucrados en el ambiente de pruebas, se establece el siguiente esquema de direccionamiento.

Dispositivo	Interfaz	Dirección	Enlace
PC1	eth0	10.10.21.3/24	ALIX1
	eth0:0	10.10.0.15/24	PC Pasarela
ALIX1	eth0	10.10.21.2/24	PC1
	eth1	10.10.1.21/24	BS
BS	lan0	10.10.1.3/24	ALIX1
	weth0	10.10.2.3/24	SS
SS	lan0	10.10.3.4/24	ALIX2
	weth0	10.10.2.4/24	BS
ALIX2	eth0	10.10.3.25/24	SS
	ath0	10.10.30.25/24	ALIX3
ALIX3	eth0	10.10.10.2/24	PC2
	ath0	10.10.30.10/24	ALIX2
PC2	eth0	10.10.10.3/24	ALIX3
	eth0:0	10.10.0.14/24	PC Pasarela

Tabla 4.1 Esquema de direccionamiento para el ambiente de pruebas.

Como se puede apreciar en la Tabla 4.1, para los equipos PC1 y PC2, fue necesaria la implementación de doble direccionamiento sobre la misma interfaz, esto con el fin de que el tráfico que se pueda generar entre estos y el equipo PC Pasarela, no transite a través de la maqueta de red y por tanto no influya en los resultados de cada una de las pruebas.

Finalmente, antes de proceder a presentar el plan de pruebas, se requiere tener en cuenta una serie de consideraciones enfocadas a obtener el resultado más fiable

posible. A continuación se presentan las consideraciones planteadas para la ejecución de las pruebas de validación.

4.1.1 Consideraciones previas.

- Es necesario desactivar, sobre las tarjetas ALIX, funcionalidades de gestión de red que vienen activas por defecto sobre el chipset Atheros que estas poseen. Esto debido a que dichas funciones pueden alterar el rendimiento de las interfaces de red y por tanto modificar las mediciones sobre el desempeño de la red.
- De acuerdo a la propuesta planteada, también se debe inhabilitar el mecanismo EDCA que viene implementado en el driver MadWiFi instalado en las tarjetas de enrutamiento ALIX.
- Teniendo en cuenta las condiciones aleatorias del canal inalámbrico y los equipos de red empleados, es de esperarse que se presenten variaciones en los resultados de las pruebas a realizarse, por tal motivo se decide realizar 10 repeticiones de cada prueba, cada una de estas con una duración de 90 segundos y con un intervalo de 30 segundos entre estas. Con el fin de obtener un resultado lo más fiable posible.
- Luego de realizado el montaje y configuración de los equipos, se procede a realizar la inyección de los flujos de tráfico por medio del generador de tráfico D-ITG (ver anexo 4). Para cada prueba se genera un Shell-script de tipo SH (ver anexo 5), mediante el cual se configuran los parámetros requeridos por D-ITG y se ejecutan los comandos necesarios para realizar la transmisión de los flujos de datos.
- Para obtener una medida del desempeño de la red, en cada inyección de tráfico, la herramienta D-ITG genera unos ficheros denominados “logs” (ver anexo 6), los cuales almacenan información estadística en cuanto a throughput, delay, jitter y pérdida de paquetes ocurrida en la transmisión. Estos archivos serán enviados al equipo denominado PC Pasarela, el cual, como ya se ha planteado se comunica con los dispositivos PC1 y PC2 a través de una red externa, con el fin de que la transición de estos ficheros no influyan en las medidas de desempeño de la red heterogénea montada.
- El análisis de los resultados se basa en lo expuesto en las recomendaciones Y.1540 y Y.1541 de la ITU [42], en referencia a los niveles de tolerancia, por

tipo de tráfico, frente a los parámetros de QoS (jitter, delay, packet loss y Throughput) que serán medidos.

4.1.2 Plan de pruebas.

Con el siguiente plan de pruebas, lo que se busca es verificar el comportamiento de la red y la validez de la propuesta de integración planteada, de presentarse eventualidades específicas como lo son: saturación (cuando el flujo transmitido alcanza el min rate asignado), sobre saturación (cuando el flujo transmitido supera el min rate asignado), saturación de canal (cuando el flujo transmitido alcanza el ancho de banda del sistema) y sobre saturación de canal (cuando el flujo transmitido supera el ancho de banda del sistema).

A continuación se describen las características de cada transmisión que será realizada con el fin de validar la eficiencia y el correcto desempeño del mecanismo propuesto para brindar QoS en una red heterogénea de extremo a extremo.

- A. Sobre saturación de canal:** 4 transmisiones: una para H_VO, una para H_VI, una para H_BK y una para H_BE. Cada una de estas con un exceso del 10% de la capacidad del sistema.

- B. Sobre saturación de canal:** 4 transmisiones: una para H_VO, una para H_VI, una para H_BK y una para H_BE. Pero en este caso se contará con 3 flujos por cada tipo de tráfico. Cada uno de estos flujos se ajustará al 40% de la capacidad del sistema, es decir con un exceso del 20%.

- C. Sobre saturación de canal:** Una transmisión con 3 flujos por cada tipo de tráfico definido, cada uno al 40% del ancho de banda asignado en las configuraciones del encolamiento como mínimo ancho de banda a asegurar.

- D. H_VO en sobre saturación:** Una transmisión con 5 flujos de H_VO al 25% del ancho de banda asignado y 2 flujos de: H_VI, H_BK y HB_E cada uno al 40% del mínimo ancho de banda a asegurar.

- E. H_VI en sobre saturación:** Una transmisión con 5 flujos de H_VI al 25% del ancho de banda asignado y 2 flujos de: H_VO, H_BK y HB_E cada uno al 40% del mínimo ancho de banda a asegurar.

Buscando contar con una referencia al momento de realizar el análisis de los resultados obtenidos, este esquema de pruebas será ejecutado de la siguiente manera:

- **Sin QoS:** En primera instancia todas las funcionalidades de gestión de red de las tarjetas ALIX se encuentran deshabilitadas, sin embargo las configuraciones para el soporte de QoS en el segmento WiMAX se mantienen operativas.
- **Con QoS:** Se implementan las configuraciones de colas HTB bajo el concepto expuesto por DiffServ tal como se ha planteado en el mecanismo propuesto, de igual manera, se mantienen las configuraciones para brindar soporte de QoS en el segmento WiMAX.

De esta manera se buscará apreciar los beneficios que conlleva implementar el mecanismo propuesto para brindar QoS de extremo a extremo en la red heterogénea planteada.

4.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se presentarán los datos obtenidos tras la realización del plan de pruebas planteado en el literal anterior.

Luego, con el fin de obtener información importante en cuanto a la provisión de QoS, durante la realización de las pruebas, se analizaron los datos capturados en relación a los parámetros de red con mayor relevancia en el contexto de QoS: throughput, delay, jitter y packet loss.

4.2.1 Escenario de prueba A.

Este escenario ha sido planteado con el fin de verificar el comportamiento de la red cuando se presenta una sobre saturación del canal, teniendo presencia de tan solo uno de los tipos de tráfico definidos. Para lo cual se generan las siguientes transmisiones:

- Transmisión 1: 1 flujo de H_VO de 6.05 Mbps.
- Transmisión 2: 1 flujo de H_VI de 6.05 Mbps.
- Transmisión 3: 1 flujo de H_BK de 6.05 Mbps.
- Transmisión 4: 1 flujo de H_BE de 6.05 Mbps.

Ahora bien, de las mediciones tomadas, las cuales se observan en la Figura 4.2, se puede apreciar que se logra asegurar el min rate asignado para cada flujo, tanto para el caso sin QoS como para el caso con QoS. En cuanto a las mediciones de retardo, se observa que sin las configuraciones de QoS en WiFi, el segmento WiMAX mantiene un nivel de retardo aparentemente constante sin importar el tipo de tráfico, al aplicar QoS a WiFi, se puede ver como aumenta considerablemente el retardo para el tráfico de H_VO y como disminuye para los tráficos H_VI y H_BK, esto debido

a que, por medio del encolamiento se busca no perder demasiado del tráfico de mayor prioridad, mientras que para los demás, los filtros son más estrictos y por ende se evidencia mayores pérdidas. Por otro lado se puede apreciar que el tráfico de menor prioridad, es decir el tráfico H_BE, se encuentra notablemente afectado en cuanto a retardo, luego de aplicar las configuraciones de QoS en WiFi, esto debido a que se ha asignado un buen tamaño de cola pero no la suficiente prioridad para que los datos pertenecientes a este tipo de tráfico transiten ágilmente. Luego, en cuanto a los valores de Jitter obtenidos, se aprecia un aumento sobre las clases de tráfico H_VO y H_BE, esto debido a que se pretende pasar un flujo de 6.05 Mbps por una cola limitada a un máximo de 4 Mbps y 3 Mbps, respectivamente, por este mismo motivo, tanto para el caso con QoS como para el caso sin QoS, se puede ver un nivel de perdida de paquetes del 40% al 60%, de lo cual se puede destacar que en cada caso se está realizando una correcta priorización de paquetes puesto que las clases que muestran menores pérdidas son las clases de mayor prioridad.

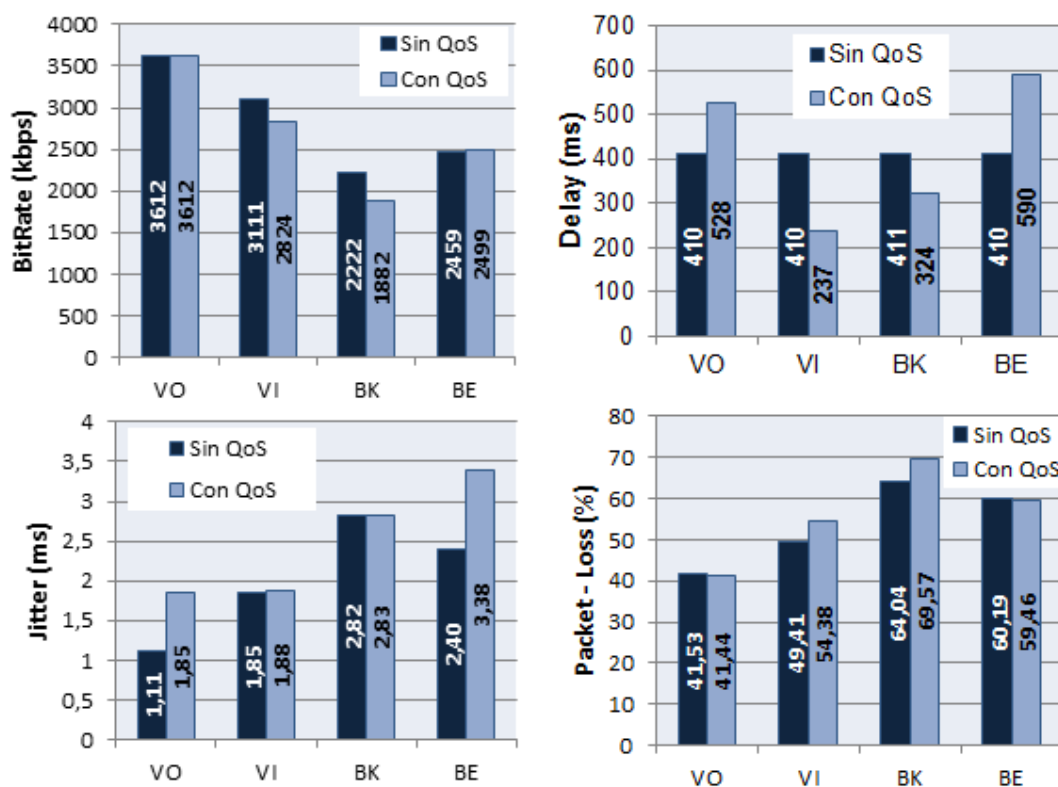


Figura 4.2 Mediciones de rendimiento por tráfico - prueba A.

Finalmente, se puede mencionar que el filtro aplicado sobre los flujos H_VI y H_BK, al ejecutar la respectiva política de descarte impuesta por el límite máximo de flujo configurado en la cola HTB, mejora notablemente el desempeño en cuanto a retardo,

pero al estar en condiciones de sobre saturación de canal, implica una gran pérdida de paquetes.

4.2.2 Escenario de prueba B.

Este escenario ha sido planteado con el fin de validar el correcto funcionamiento de los filtros SFQ implementados para gestionar la distribución de recursos de red entre flujos del mismo tipo de tráfico QoS. Al igual que en el escenario anterior, en este caso también se presenta una sobre saturación del canal, por lo cual para cada tipo de tráfico se han generado 3 flujos cada uno de 2.2 Mbps, con lo cual se realizarán 4 transmisiones de 6.6 Mbps respectivamente.

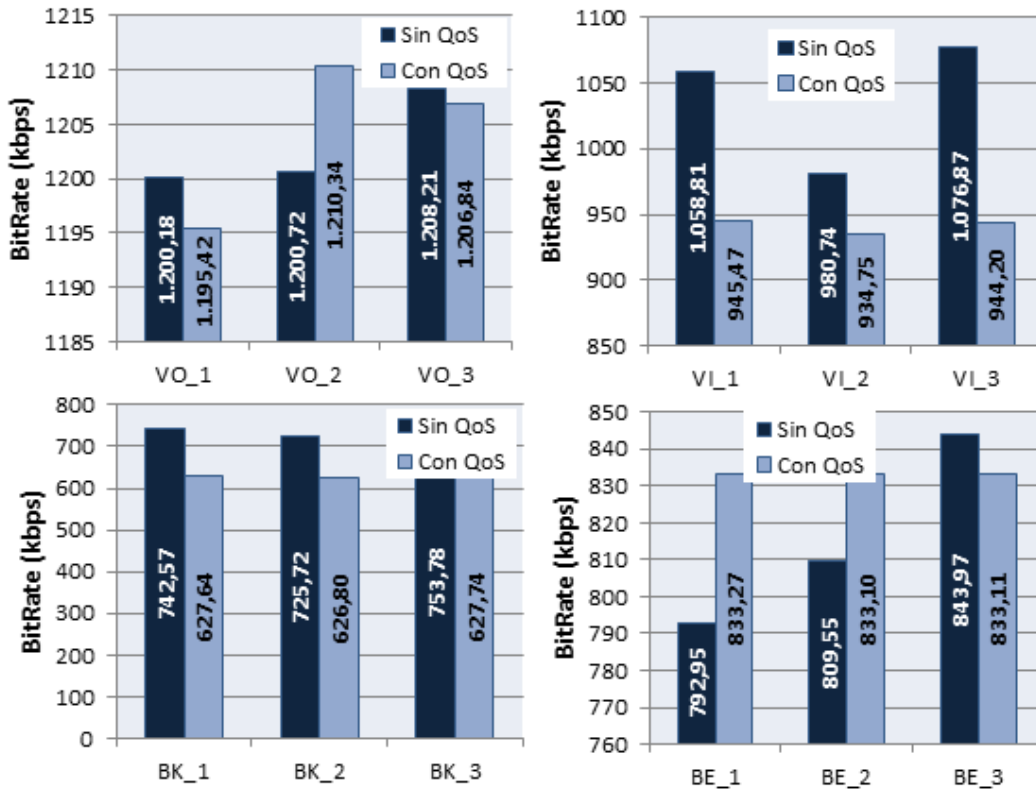


Figura 4.3 Mediciones de caudal por tráfico - prueba B.

Así pues, al verificar los resultados expuestos en la Figura 4.3, en relación al caudal alcanzado por cada flujo de cada tipo de tráfico, se puede apreciar que se ha logrado una distribución mucho más equitativa del ancho de banda disponible, para el caso con QoS en comparación al caso sin QoS. También, es válido mencionar que se ha logrado asegurar el mínimo de ancho de banda configurado en cada caso. No obstante, para los resultados obtenidos sobre las pruebas con la clase de tráfico H_VO, se puede ver una alteración entre los flujos, esto posiblemente por la presencia de otras señales interferentes en el laboratorio.

En cuanto a las mediciones obtenidas en relación al retardo, de la Figura 4.4 se puede concluir que: al igual que en el caso anterior, el encolamiento configurado produce un aumento considerable sobre los tráficos H_VO y H_BE, esto debido a la prioridad de cada uno, es decir, para H_VO se trata de obtener menos pérdidas y para H_BE a cada paquete le toma mucho tiempo ser transferido al siguiente nodo.

Lo anterior, demuestra que: bajo condiciones de sobre saturación de canal, encolar un número mayor de paquetes, para evitar la pérdida de los mismos, provoca un aumento en el nivel de retardo, esto evidentemente debido a que cada nodo deberá gestionar una mayor cantidad de tráfico, utilizando un canal que no tiene la capacidad para ello, por lo tanto los paquetes que no pueden ser enviados se retrasan en la cola o finalmente son descartados.

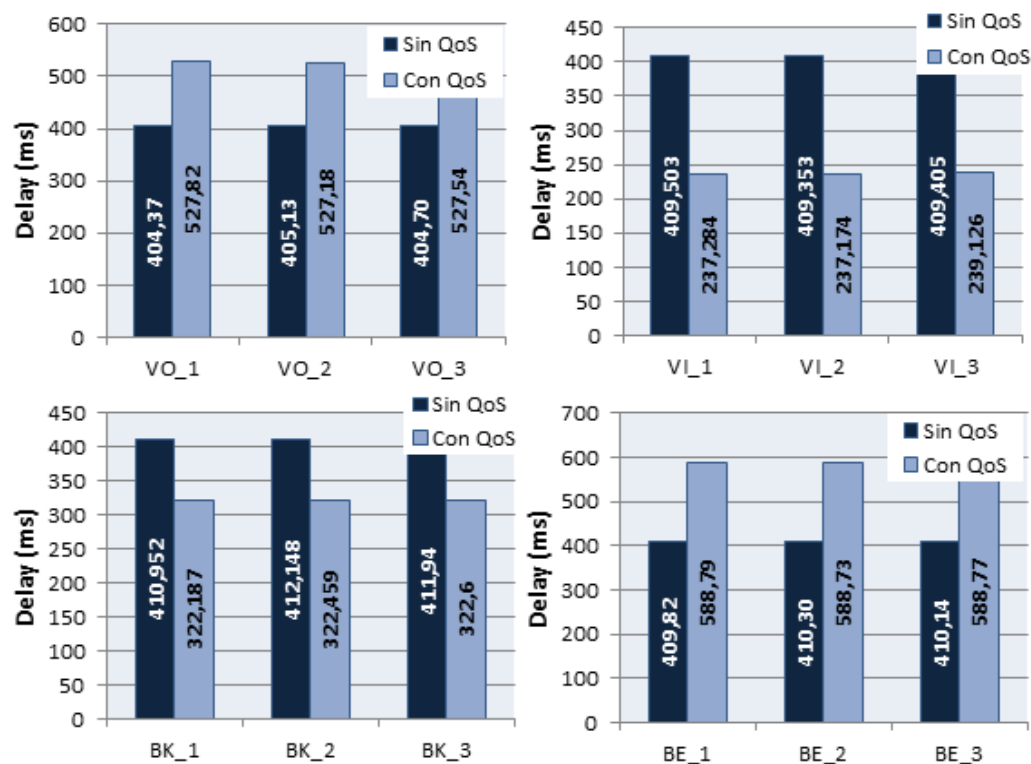


Figura 4.4 Mediciones de retardo por tráfico - prueba B.

De la Figura 4.5 se puede observar que la variación del retardo aumenta al incrementar el número de flujos de datos en la red, esto debido a que al requerir un proceso adicional de encolamiento, es decir, las colas SFQ, aumenta la variabilidad en cuanto al posicionamiento de los paquetes en la cola HTB, la cual es la que finalmente pondrá los paquetes en la interfaz de salida, aumenta también el retardo y la variabilidad del mismo.

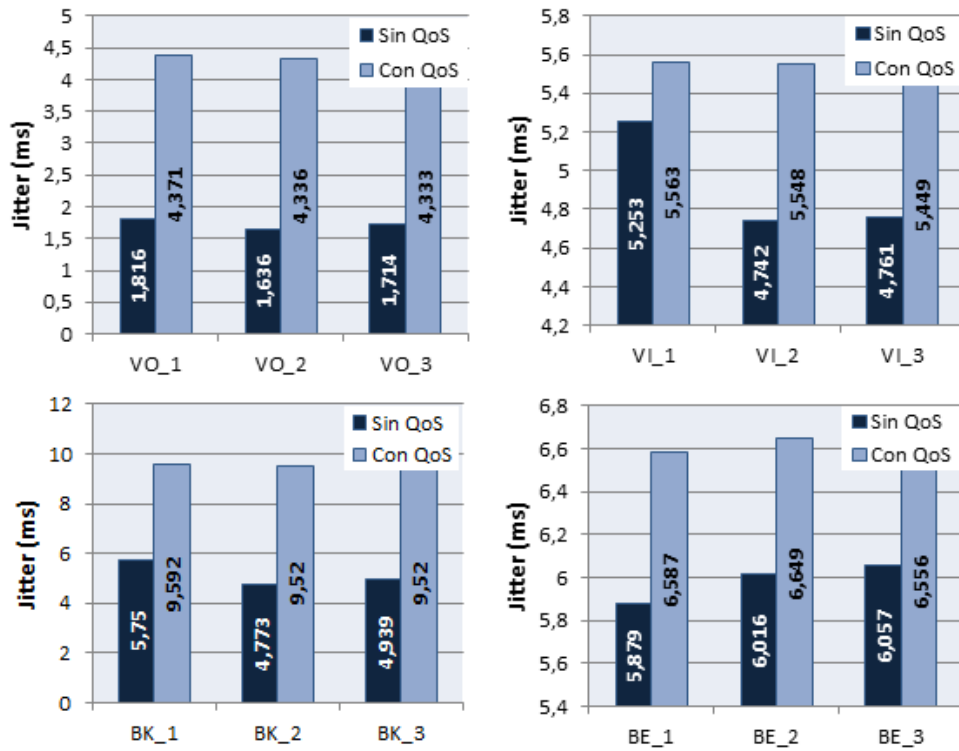


Figura 4.5 Mediciones de jitter por tráfico - prueba B.

En cuanto a la pérdida de paquetes, de la Figura 4.6, se observa un comportamiento similar al escenario anterior, donde los filtros configurados generan un gran aumento en este parámetro para los flujos correspondientes a H_VI y H_BK, sin embargo de esta manera se asegura un bajo retardo para estos mismos.

Finalmente, es evidente que en condiciones de sobre saturación de canal, las configuraciones realizadas para brindar soporte de QoS, tanto en el segmento WiMAX, como las realizadas sobre el segmento WiFi, resultan no ser suficientes para asegurar un buen servicio, puesto que los niveles de retardo obtenidos son demasiado altos.

Por otro lado, en comparación, al realizar las configuraciones de QoS sobre el segmento WiFi, se producen aumentos en cuanto a retardo para el tráfico de mayor prioridad y en las pérdidas de paquetes para los demás tipos de tráfico. En cuanto al caudal alcanzado, debido a que en cada caso tan solo se cuenta con una clase de tráfico transitando en la red y teniendo en cuenta que los límites parametrizados en WiMAX son mayores a los configurados en WiFi, obviamente se obtiene un mayor caudal para el caso sin QoS en comparación al caso con QoS, sin embargo para este último caso, cabe mencionarse que esto puede solucionarse al aumentar los límites máximos de caudal para cada tipo de tráfico.

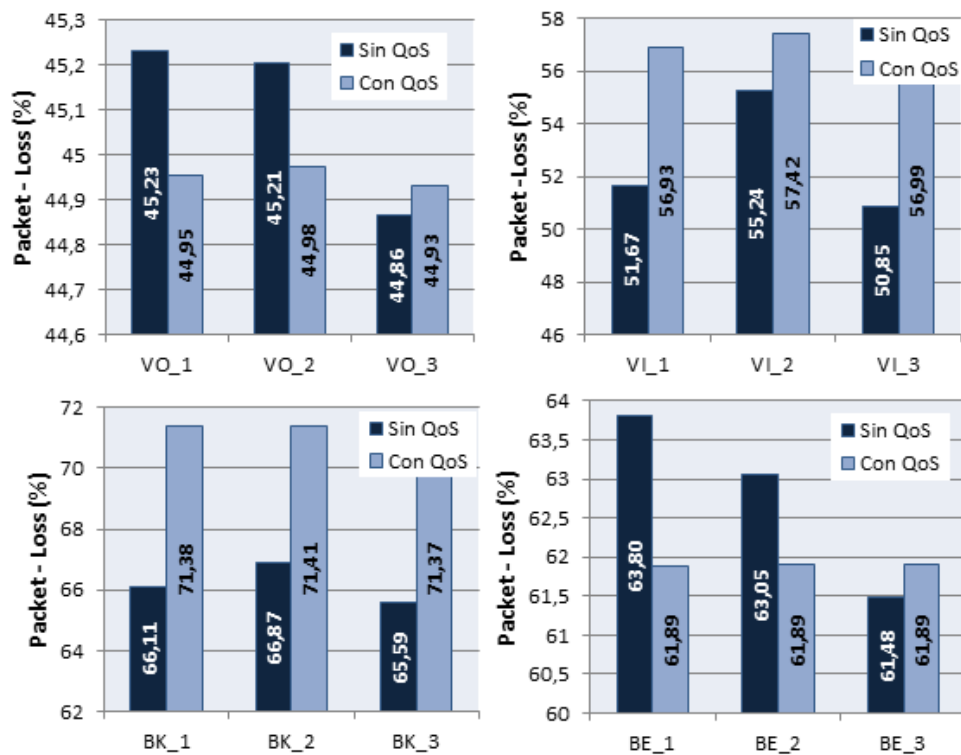


Figura 4.6 Perdida de paquetes por tráfico - prueba B.

4.2.3 Escenario de prueba C.

Este escenario ha sido planteado con el fin de verificar el comportamiento de la red cuando se presenta una sobre saturación del canal, en presencia de los 4 tipos de tráfico definidos. Para lo cual se ha generado una transmisión con:

- 3 flujos de H_VO, cada uno a 800 Kbps.
- 3 flujos de H_VI, cada uno a 600 Kbps.
- 3 flujos de H_BK, cada uno a 400 Kbps.
- 3 flujos de H_BE, cada uno a 400 Kbps.

Con lo cual se tiene un flujo total de 6.6 Mbps.

Entonces, al examinar los resultados expuestos en la Figura 4.7, en relación al caudal alcanzado por cada flujo de cada tipo de tráfico, se puede apreciar que: en ninguno de los casos, con QoS o sin QoS, se ha logrado asegurar el mínimo ancho de banda configurado, esto dada la evidente congestión de tráfico en la red. No obstante, se puede apreciar el correcto funcionamiento de la priorización de clases de tráfico, así como una equitativa distribución del ancho de banda, para el caso con QoS.

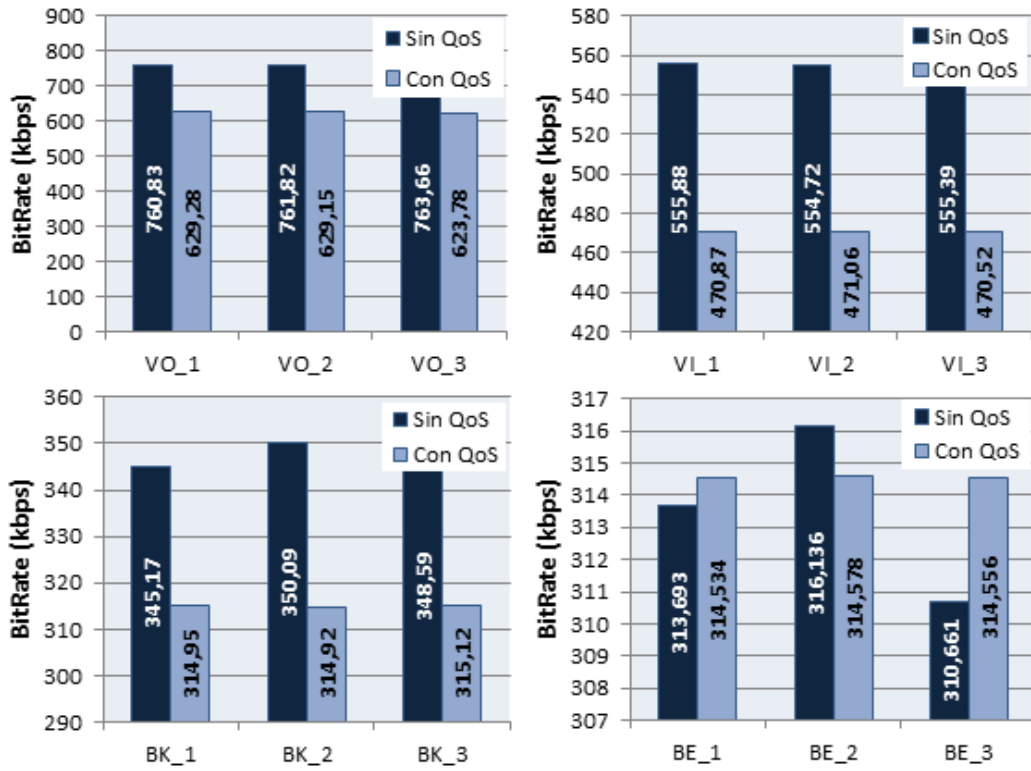


Figura 4.7 Mediciones de caudal por tráfico - prueba C.

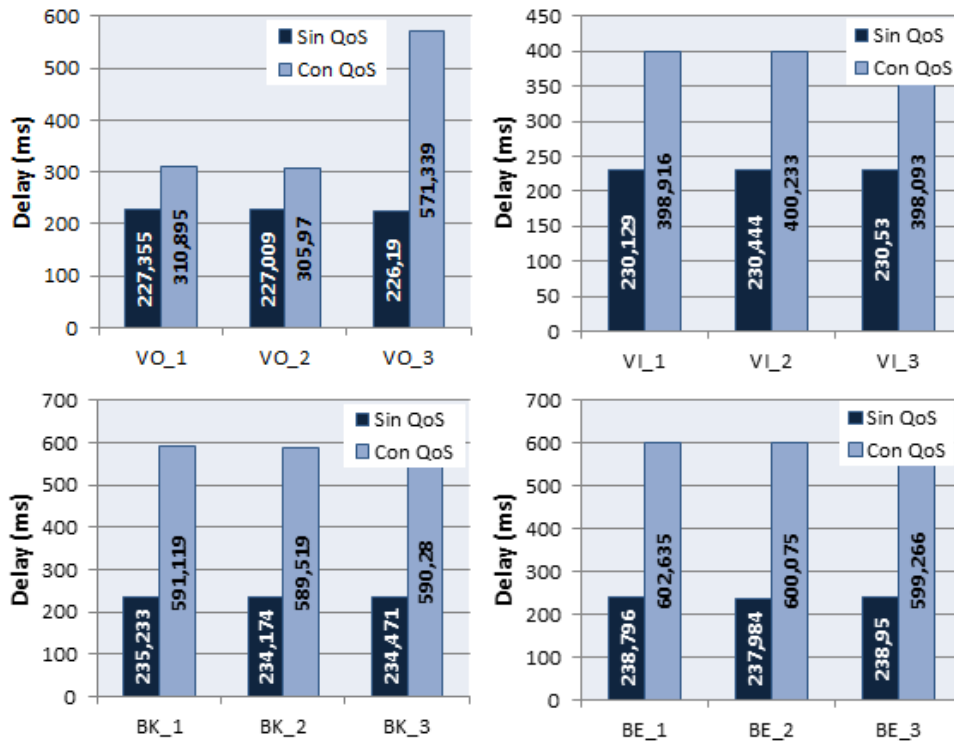


Figura 4.8 Mediciones de retardo por tráfico - prueba C.

Con respecto a las mediciones obtenidas en cuanto al retardo, de la Figura 4.8 se puede deducir que: al igual que en los casos anteriores donde se presenta sobre saturación de canal, se puede apreciar la tendencia al aumento del retardo luego de aplicar las configuraciones para el caso con QoS, aunque en esta ocasión, este comportamiento se presenta para todos los tipos de tráfico. Visiblemente, bajo condiciones extremas, como las presentadas en una sobre saturación de canal, el proceso de encolamiento junto a las políticas para el descarte de paquetes produce un aumento en el nivel de retardo en la red.

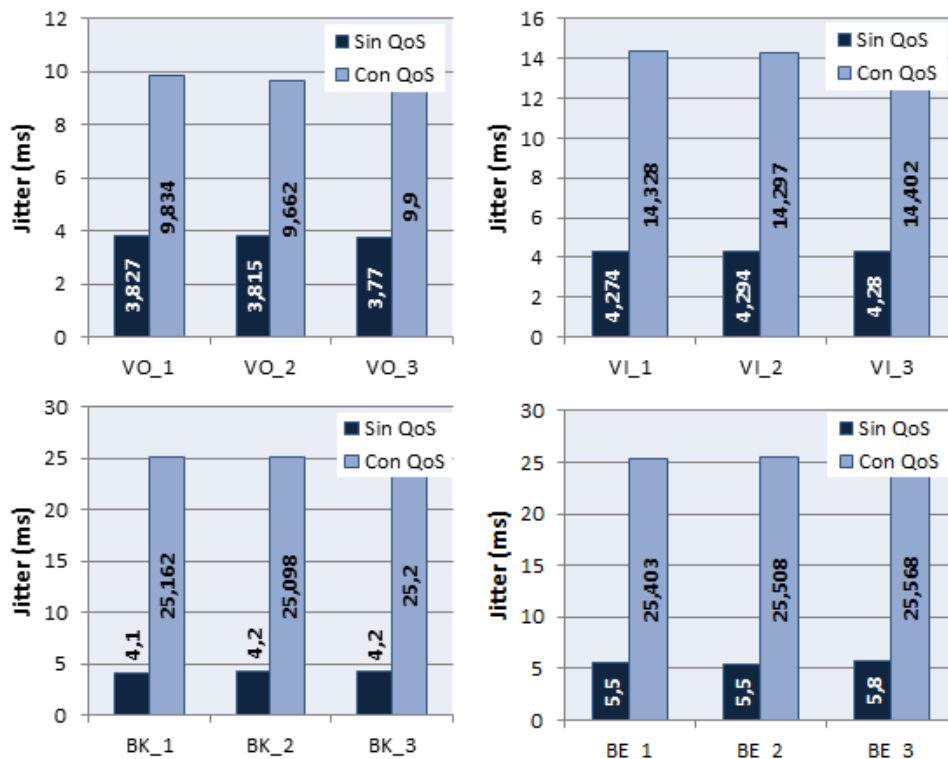


Figura 4.9 Mediciones de jitter por tráfico - prueba C.

Ahora bien, en la Figura 4.9 se puede ver como en este caso se mantiene la tendencia al aumento de la variación del retardo, aunque ciertamente este aumento es mucho mayor en comparación a los dos casos anteriores, esto debido a que la inclusión de diferentes clases de tráfico generan un aumento en la complejidad de las operaciones de encolamiento y filtrado, con lo cual aumenta también la variabilidad en la distribución de los paquetes.

En cuanto a la pérdida de paquetes, de la Figura 4.10 se observa que todos los tipos de tráfico se han visto afectados en el caso con QoS, esto debido a la aplicación de los filtros configurados, ya que estos restringen el paso de un mayor número de

paquetes en comparación al flujo de paquetes que permiten las configuraciones realizadas en el segmento WiMAX.

Indudablemente este escenario de prueba es un poco más real que los dos escenarios anteriores, aun así, se mantiene la tendencia a obtener un mejor desempeño de la red cuando solo se cuenta con las configuraciones de QoS en el segmento WiMAX, esto ya que las configuraciones que se realizan sobre el segmento WiFi, para los casos definidos, aumentan la complejidad de la red y al mismo tiempo los procedimientos que se deben efectuar sobre cada paquete que transita al interior de esta, así mismo, se logra evidenciar que las parametrizaciones realizadas, al ser inferiores a lo asignado en el segmento WiMAX, generan restricciones que afectan el desempeño de la red.

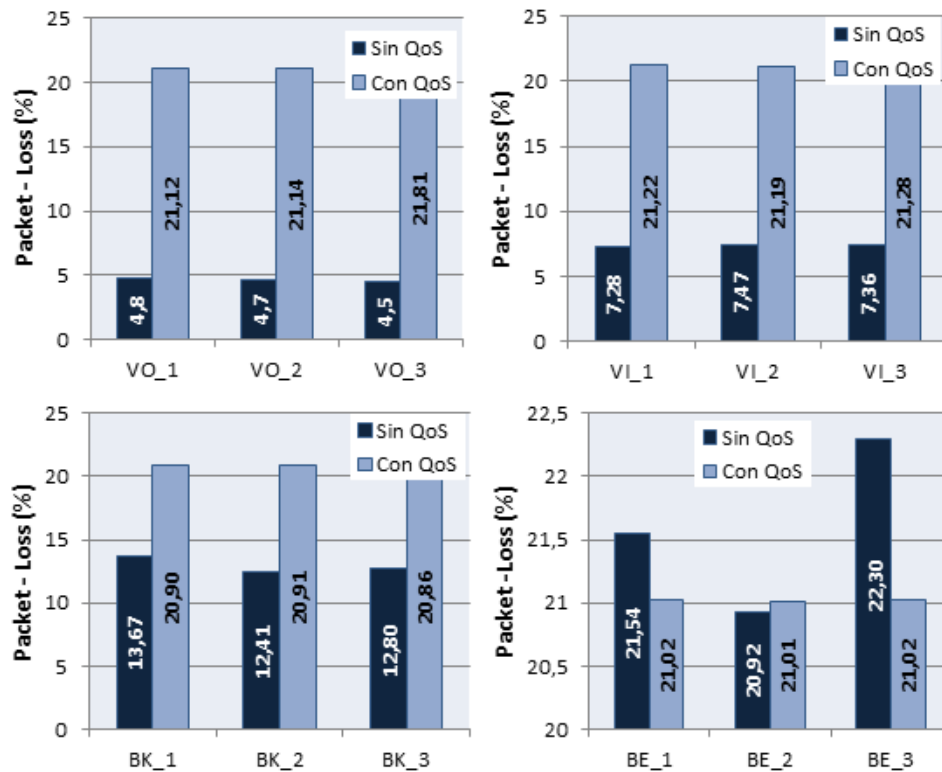


Figura 4.10 Perdida de paquetes por tráfico - prueba C.

4.2.4 Escenario de prueba D.

Este escenario ha sido planteado con el fin de evaluar la efectividad del mecanismo propuesto, al presentarse una sobre saturación en el tráfico de H_VO, flujo de mayor prioridad, en presencia de otros flujos de tráfico de menor prioridad. Para lo cual se realiza una transmisión con las siguientes características:

- flujos de H_VO, cada uno a 500 Kbps.
- 2 flujos de H_VI, cada uno a 600 Kbps.
- 2 flujos de H_BK, cada uno a 400 Kbps.
- 2 flujos de H_BE, cada uno a 400 Kbps.

Con lo cual se tiene un flujo total de 5.3 Mbps.

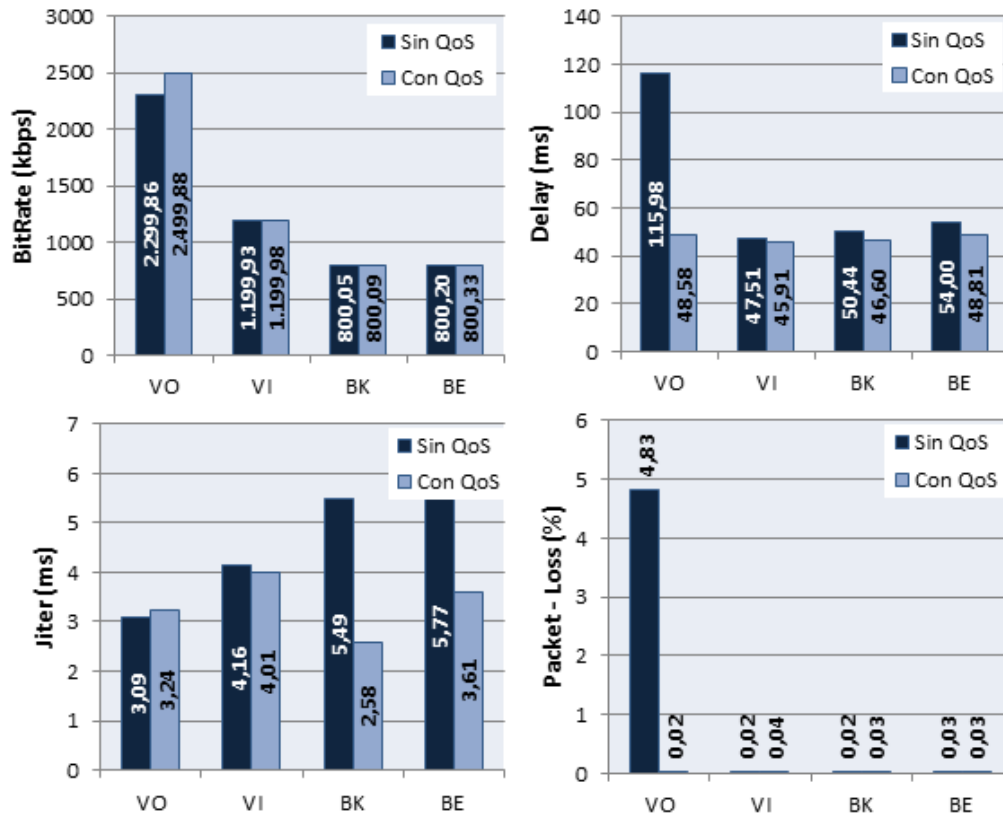


Figura 4.11 Mediciones de rendimiento por tráfico - prueba D.

Así pues, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.11, de la cual se observa como las configuraciones de QoS del segmento WiMAX no logran asegurar el ancho de banda requerido por el tráfico H_VO, por el contrario al aplicar las configuraciones de QoS definidas para el segmento WiFi, no solo se asegura el mínimo configurado si no que se alcanza un 99.99% del flujo enviado.

De igual manera, en cuanto al retardo, se aprecia como al realizar las configuraciones para brindar QoS sobre el segmento WiFi, se logra obtener un nivel de retardo aceptable dentro de lo especificado para el tipo de tráfico H_VO [42]. En contraste el servicio de QoS que brinda el segmento WiMAX por sí solo no logra brindar las condiciones que este tipo de tráfico requiere para considerar que opera

con un buen nivel de calidad de servicio. Esto también se ve reflejado al observar los datos obtenidos en cuanto a pérdida de paquetes, puesto que solo se aprecian pérdidas para el tipo de tráfico H_VO en el caso sin QoS.

Por otro lado, al verificar los datos obtenidos en relación a la variación del retardo, se observa que de manera similar a los datos obtenidos para el retardo, tan solo se presenta una variación para el flujo H_VO, en el caso sin QoS.

4.2.5 Escenario de prueba E.

Este escenario ha sido planteado con el fin de evaluar la efectividad del mecanismo propuesto, al presentarse una sobre saturación en el tráfico de H_VI, segundo flujo de mayor prioridad, en presencia de otros flujos de tráfico de menor y mayor prioridad. Para lo cual se realiza una transmisión con las siguientes características:

- flujos de H_VI, cada uno a 372 Kbps.
- 2 flujos de H_VO, cada uno a 800 Kbps.
- 2 flujos de H_BK, cada uno a 400 Kbps.
- 2 flujos de H_BE, cada uno a 400 Kbps.

Con lo cual se tiene un flujo total de 5.06 Mbps. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

De los datos que se ven en la Figura 4.17, se puede observar un comportamiento de muy similar por parte de la red, con y sin aplicar las configuraciones de QoS en el segmento WiFi.

En ambos casos se logra brindar el ancho de banda requerido por cada tipo de tráfico, razón por la cual no se aprecian aumentos en cuanto a retardo o pérdida de paquetes y la variación del retardo se mantiene estable.

Así pues, se puede decir que las configuraciones realizadas sobre el segmento WiMAX para dar soporte de QoS, en la red heterogénea, son lo suficientemente efectivas para mantener un buen nivel de calidad de servicio, al tratarse de flujos de datos con baja prioridad, sin embargo, para flujos con mayor prioridad, no logran ser suficientes para cumplir con los requerimientos que exige un tipo de tráfico como el H_VO.

Finalmente, puede concluirse que, el hecho de realizar cualquier configuración para brindar QoS sobre una red heterogénea, conformada por segmentos WiMAX y WiFi, permite contar con un trato diferenciado sobre los flujos de datos que transiten a través de esta, de manera que se logra cumplir con ciertas exigencias de QoS, como

lo son un mínimo de ancho de banda requerido, o un nivel máximo de tolerancia frente al retardo y la variación del mismo.

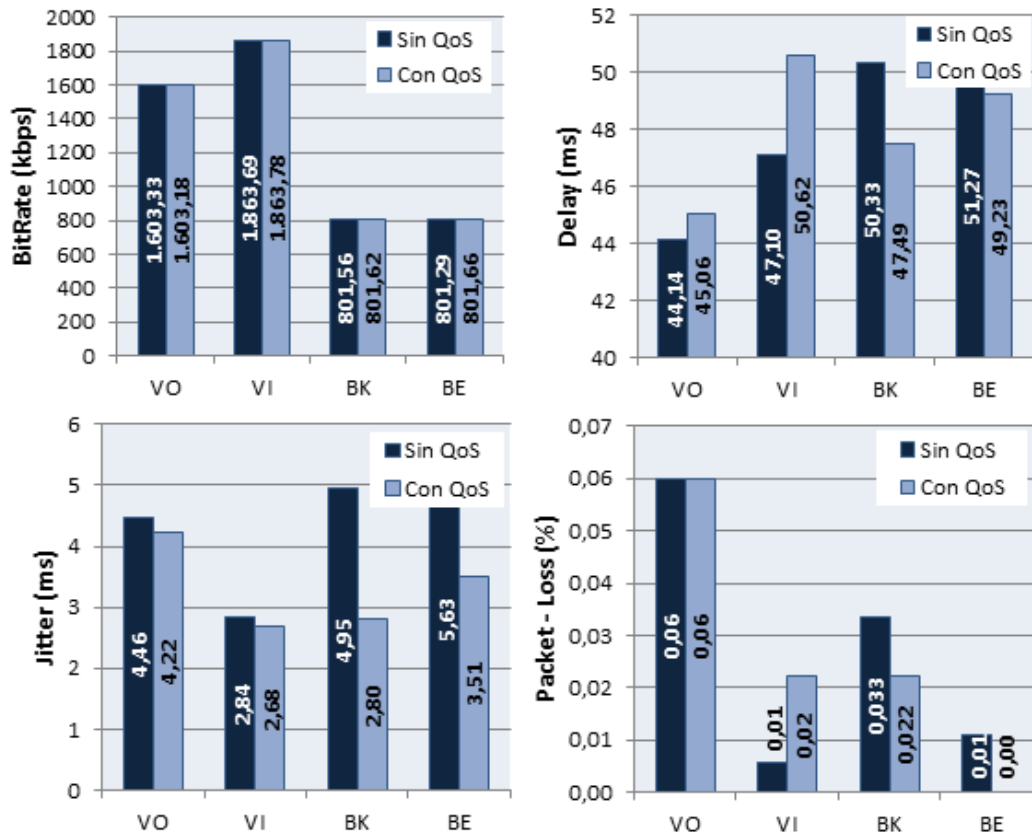


Figura 4.12 Mediciones de rendimiento por tráfico - prueba E.

También, se puede apreciar que implementar, en comunión, mecanismos para brindar QoS sobre cada segmento que conforma la red (WiMAX y WiFi, en este caso DiffServ), perfecciona el nivel de QoS que puede ser ofrecido a los flujos que transitan a través de la red, a diferencia de lo que se logra con tan solo configurar uno de los segmentos, o peor aún, con no implementar ningún mecanismo para dar soporte de QoS.

Capítulo 5

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del presente proyecto de grado, fundamenta su temática para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la integración WiMAX y WiFi con soporte de QoS mediante dispositivos de enrutamiento bajo la plataforma Linux

En el presente capítulo se reúne las conclusiones, contribuciones y trabajos futuros identificados. Las conclusiones son resultado de los objetivos y el trabajo desarrollado para alcanzarlos, las recomendaciones y trabajos futuros son producto de la metodología y ejecución de las pruebas en el ambiente de laboratorio.

5.1 CONCLUSIONES

- Se aporta un mecanismo de referencia para realizar el mapeo de los tipos de servicio definidos en WiMAX hacia los definidos en WiFi, el cual comprende una comunicación a nivel de capa IP mediante el empleo de software libre.
- Se ha construido un mecanismo de comunicación WiMAX/WiFi, en el cual los componentes hardware y software operan en conjunto para alcanzar un nivel de QoS óptimo que brinde una buena experiencia de usuario a un bajo costo para el operador.
- Durante la implementación del mecanismo propuesto, se observa que Linux provee acceso a los componentes hardware y software de los dispositivos de red utilizados a través de drivers y librerías que permiten la debida configuración de estos.
- Una correcta implementación de mecanismos para proveer QoS en redes de comunicaciones, representa para el usuario final diversos beneficios, partiendo del hecho de contar con un óptimo uso de los recursos disponibles, especialmente en casos de congestión, hasta llegar a contar con una gestión eficiente de las aplicaciones con gran sensibilidad al retardo y jitter. No obstante, es de gran importancia tener presente que esta implementación trae consigo un aumento en los costos y la complejidad en el despliegue y la operación de dicha red.

- El control de admisión es un factor determinante en el desempeño de una red de comunicaciones inalámbrica, puesto que al contar con un limitado ancho de banda disponible, dicho control permite evitar congestiones de tráfico que eventualmente provocarán una degradación en el rendimiento general de la red o incluso pueden llegar a inutilizar enlaces ya presentes.
- La implementación de mecanismos de encolamiento como parte de un sistema para asegurar un determinado nivel de QoS, en especial para un servicio de QoS parametrizada, facilita la delimitación y determinación de prioridades entre distintos paquetes, no obstante, es de especial cuidado determinar cuando y donde se debe aplicar un encolamiento en la red, pues una mala configuración será causante de un aumento inesperado en el valor del retardo percibido en las transmisiones.
- En una red heterogénea conformada por segmentos WiMAX y segmentos WiFi, se puede llegar a brindar un cierto nivel de calidad de servicio tan solo realizando las debidas configuraciones sobre el segmento WiMAX, sin embargo, el no aplicar ningún mecanismo para dar soporte de QoS en el segmento WiFi supone una incertidumbre en cuanto al desempeño o comportamiento de la red frente diferentes tipos de tráfico.
- Al implementar soporte de QoS en redes heterogéneas, se debe dar coherencia entre los mecanismos aplicados sobre cada segmento de red, ya que una mala configuración, en alguno de los métodos aplicados, puede generar conflictos entre los segmentos de red y al final resultaran siendo limitantes en el desempeño de la red en lugar de brindar el aprovisionamiento de QoS deseado.

5.2 RECOMENDACIONES

- El presente proyecto de grado, es de gran utilidad para el desarrollo de nuevos proyectos de telecomunicaciones y desarrollo social en zonas apartadas o inhóspitas, especialmente para los gobiernos que deseen aumentar la inclusión de sus habitantes o los operadores que buscan ampliar el rango de sus clientes mediante la implementación de redes heterogéneas bajo las tecnologías analizadas.
- Para la realización de las pruebas y con el objetivo de aumentar la confiabilidad de los resultados, se recomienda controlar y ajustar la mayor

cantidad de parámetros posible, así como realizar un muestreo de 0,01 segundos durante el tiempo estimado y para cada una de las repeticiones.

- Para el desarrollo del proyecto de grado, es de gran importancia la definición de una metodología que permita mantener un orden en cuanto al planteamiento, implementación y ejecución del mismo, con la finalidad de obtener resultados relevantes dentro del contexto sobre el cual se ha planteado el proyecto de grado.

5.3 TRABAJO FUTURO

Mediante el cumplimiento de los objetivos del proyecto de grado, ha sido posible identificar nuevas líneas de investigación para mejorar el mecanismo de aprovisionamiento de QoS aquí descrito:

- El diseño de un algoritmo de monitoreo y gestión en la capa MAC, que permita realizar una asignación dinámica a los parámetros de configuración de QoS, tanto para EDCA como para HTB, de modo que se logre optimizar el uso de los recursos de red disponibles en todo momento y no tan solo para ciertos escenarios.
- La automatización de las configuraciones sobre los equipos WiMAX en relación a los recursos disponibles en los segmentos de red WiFi, de modo que se mantenga coherencia entre los mecanismos para el aprovisionamiento de QoS en todo momento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] David L. Black and Paul Jones. Differentiated Services (Diffserv) and Real-Time Communication. RFC 7657, November 2015.
- [2] Lidong Zhu and Kwan L Yeung. Link quality based edca mac protocol for wave vehicular networks. In *Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), 2013 International Conference on*, volume 1, pages 1–6. IEEE, 2013.
- [3] Luis Gabriel Ferrer et al. Política del plan “vive digital” y la implementación de la estrategia de gobierno en línea en el orden nacional y territorial para una mejor relación entre estado y ciudadano. 2014. Accessed: 2016-03-02.
- [4] Abiel Roche Lima, Etienne Herrera Marrero, Carmen Moliner Peña, Anaily Sotolongo Gomez, Yanelis Vega Reyes, and Abdiel Gonzalez Diaz. Estudio de caso de un enlace de red inalámbrico en una zona rural. propuesta de conexión para entidades agropecuarias. *Revista Ingeniería Industrial*, 4(1), 2014.
- [5] IEEE 802.16 Working Group et al. IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 16: air interface for broadband wireless access systems, amendment 3. *IEEE Std*, 802:1–1112, 2011.
- [6] Abdulrahman Yarali, Saifur Rahman, and Bwanga Mbula. Wimax: the innovative broadband wireless access technology. *Journal of Communications*, 3(2):53–63, 2008.
- [7] Jyrki TJ Penttinen. *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*. John Wiley & Sons, 2015.
- [8] IOS Cisco. Release 12.1 quality of service solutions configuration guide—congestion avoidance overview, 2013.
- [9] Carlos Ramírez Pérez. Coexistencia socialmente responsable de redes inalámbricas. 2012.
- [10] Cynthia Karla Villena Avila. Diseño de una red rural de telecomunicación para aplicación en educación asistida por tecnología web en purús-ucayali. 2014.
- [11] Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones. Plan vive Digital 2014 - 2018. http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-5193_recurso_2.pdf, 2014. Accessed: 2016-03-02.

- [12] Fidas G Arias. *El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica. 5ta.* Fidas G. Arias Odón, 2012.
- [13] Nirmal Andrews, Yogesh Kondareddy, and Prathima Agrawal. Channel management in collocated wifi-wimax networks. In *System Theory (SSST), 2010 42nd Southeastern Symposium on*, pages 133–137. IEEE, 2010.
- [14] Jorge Venes and Luis M Correia. Performance of a heterogeneous network with umts, wi-fi and wimax. In *EUROCON-International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE*, pages 1–4. IEEE, 2011.
- [15] Md Golam Rabbani, Joarder Kamruzzaman, Iqbal Gondal, and Iftekhar Ahmad. A new resource distribution model for improved qos in an integrated wimax/wifi architecture. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, pages 266–271. IEEE, 2011.
- [16] C Hari Kishan and P Bala Krishna Prasad. A qos management architecture in heterogeneous wireless networks environment. 2012.
- [17] Nitul Dutta and Sangappa Ramachandra Biradar. Interoperability of wifi and wimax. In *Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC), 2012 2nd IEEE International Conference on*, pages 747–751. IEEE, 2012.
- [18] Claudina Rattaro. Mediciones y aprendizaje estadístico aplicado a problemas de redes inalámbricas. Master's thesis, Universidad de la República, Montevideo, 10 2012.
- [19] Weifeng Sun, Peng Zhang, Y Chen, Z Qin, and Da Teng. A tight coupling cooperation scheme in wifi/wimax heterogeneous mesh networks. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 8(3), 2013.
- [20] Laura B Terán R and Maicol A Cuastuza. Evaluación del efecto del handover en un contexto de micromovilidad ipv6 sobre un servicio de tiempo real, Agosto 2011. Universidad del Cauca.
- [21] Maria A Murazzo, Nelson R Rodriguez, Mará Scheffer, and Miguel José Guevara. Soporte de qos para tráfico heterogéneo en ambientes manet. In *XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2014.
- [22] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION ITU. Calidad de Servicio en las Comunicaciones: Marco y Definiciones. Series G: Sistemas y Medios de Transmisión, Sistemas y Redes Digitales G.1000, International Telecommunication Union, Suiza, Ginebra, nov 2001. ITU-T Recommendation G.1000.

- [23] Yvonne Umutoni. Minimum quality of service parameters internet and mobile services. ITU Workshop on “Quality of Service and Quality of Experience of Multimedia Services in Emerging Networks”, 2 2015.
- [24] Rosario Villarreal and Marco Aurelio. Evaluación del impacto de los mecanismos de control de error en la calidad de servicio de telefonía ip basado en asterisk sobre una red inalámbrica de banda ancha en la provincia de tayacajahuancavelica. 2014.
- [25] Diego Fernando Rueda Pepinosa and ZOILA INÉS RAMOS RODRÍGUEZ. Revisión de la implementación del servicio de iptv sobre redes inalámbricas y móviles con calidad de servicio (qos). *REVISTA UIS INGENIERÍAS*, 12(1), 2013.
- [26] Maria A Murazzo, Nelson R Rodriguez, Ricardo Vergara, Franco Carrizo, Facundo González, and Enzo Grosso. Administración de qos en ambientes de redes de servicios convergentes. In *XV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2013.
- [27] Daniel A Jaramillo M and Daniel E Jaramillo L. Impacto de la topología de red en el desempeño de una red de Área corporal, Junio 2013. Universidad del Cauca.
- [28] Ricardo Alarcon Llamas. Estudio e implementación de mecanismos de calidad de servicio sobre una arquitectura de servicios diferenciados, Enero 2003. Universidad Politecnica de Cartagena - Escuela Tecnica superior de Ingenieria de Telecomunicacion.
- [29] Octavio José Salcedo Parra, Danilo López, and Ángela Patricia Rós. Desempeño de la calidad del servicio (qos) sobre ipv6. *Revista Tecnura*, 15(28):32–41, 2012.
- [30] Flavius Pana and Ferdi Put. A survey on the evolution of rsvp. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 15(4):1859–1887, 2013.
- [31] Sarat S. Mavuduru Muddada M. Krishna Kuda N. Rao, N.Thirupathi Rao and K. Asish. Achieving qos guarantees over ip networks using diffserv. *International Journal of Futuristic Science Engineering and Technology*, 1, 2013. Issue 3.
- [32] Carlos García García. Propuesta de arquitectura de qos en entorno inalámbrico 802.11 e basado en diffserv con ajuste dinámico de parámetros. Junio 2006. Universidad Carlos III de Madrid.

- [33] Fernando Rezende Dejanao and Marcos Augusto Bellezi. Alta disponibilidad: Balanceamiento de carga e tolerância à falhas utilizando roteamento, firewall e qos avanzado na plataforma linux. *Revista TIS*, 3(1), 2014.
- [34] Jon Latorre Martínez. Introducción a control del tráfico y a calidad de servicio en GNU/Linux. 2004. Metabolik Bio Hacklab. Disponible en: <http://etxea.net/docu/qos/qos.html>.
- [35] José Manuel Aguilar González. Desarrollo de un interfaz de configuración para la herramienta tc e implementación del protocolo radius en la red inalámbrica de la unan-rucfa. 2012.
- [36] Mario Rodrigo Camana Acosta. *Estudio comparativo de Calidad de Servicio utilizando simulación en una WLAN con el estándar IEEE 802.11 e para tráfico de voz, video y datos*. PhD thesis, Quito, 2016., 2016.
- [37] Myounghwan Lee and John A Copeland. An adaptive end-to-end delay assurance algorithm with diffserv architecture in ieee 802.11 e/ieee 802.16 hybrid mesh/relay networks. In *Computer Communications and Networks, 2009. ICCCN 2009. Proceedings of 18th International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [38] Pijo Pérez and Luis Alberto. Diseño de una red wimax para el valle de churn-lima. 2013.
- [39] Elkin Ospina Martinez and Leonardo Betancur Agudelo. Fbmc, una opción para un uso óptimo del espectro electromagnético. *Revista en telecomunicaciones e informática*, 3(5):39–53, 2013.
- [40] Ernesto Apú Picado. Análisis de las tecnologás de redes heterogéneas (hetnet) en los sistemas móviles estudio caso: Technologás lightradio™.
- [41] Albentia Systems, C/Margarita Salas 22, Parque Tecnológico de Leganes, 28918 Leganes (Madrid) España. *ARBA550 BS Series - User Guide*, 3.3 edition, 5 2011.
- [42] Alexander Olave, Luis Felipe Valencia, and Juan Carlos Cuéllar. Análisis basado en parámetros qos para el servicio voip sobre wireless en un campus universitario [analysis based on qos parameters for voip service on a wireless network within a university campus]. *Ventana Informática*, (31), 2014.
- [43] M Gates, A Tirumala, J Dugan, and K Gibbs. Iperf version 1.7. 0, iperf user docs, march 2003, 2014.

[44] Alessio Botta and Alberto Dainotti and Antonio Pescapè. A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios. *Computer Networks*, 56(15):3531–3547, 2012.