

**CALIDAD DE SERVICIO MULTICAPA EN UNA RED *IP* BASADA EN
*WIMAX***

JULIETH KATHERIN ARIZA OLARTE

SERGIO MANUEL RACINI BUENO

Estudiantes de Ingeniería Electrónica

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2009

**CALIDAD DE SERVICIO MULTICAPA EN UNA RED *IP* BASADA EN
*WIMAX***

JULIETH KATHERIN ARIZA OLARTE

SERGIO MANUEL RACINI BUENO

Estudiantes de Ingeniería Electrónica

Trabajo de grado presentada como requisito para optar el título de Ingeniero
Electrónico

DIRECTOR DEL PROYECTO:

JHON JAIRO PADILLA AGUILAR, PhD.

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

2009

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Noviembre de 2009

A Dios, a mi mami Blanca, hermanos, suegros y a Sergio Manuel mi novio,
quienes siempre estuvieron apoyándome de manera constante e incondicional
en esta etapa de mi vida.

Julieth

A mis padres Manuel y Blanca, a mis hermanos José Luis, Carlos y Dubis, a mi novia Julieth y a la señora Blanca Olarte por su apoyo incondicional en mi vida.

Sergio

AGRADECIMIENTOS

A Jhon Jairo Padilla Aguilar nuestro director de proyecto por su apoyo y sabios aportes en el desarrollo de este proceso.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por brindar tan valiosas enseñanzas en el transcurso como estudiantes de ingeniería.

A los amigos, compañeros de clases y profesores quienes en su momento hicieron contribuciones en la formación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS	3
1 PROTOCOLO DE <i>INTERNET</i> VERSION 4.....	4
1.1 GENERALIDADES.....	4
1.1.1 Partes del Datagrama <i>IPv4</i>	5
1.1.2 Direccionamiento	8
2 CALIDAD DE SERVICIO EN <i>INTERNET</i> (QoS).....	9
2.1 INTRODUCCIÓN.....	9
2.2 PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO.....	10
2.2.1 Ancho de Banda (<i>Bandwidth</i>)	11
2.2.2 Retardo (<i>Delay</i>).....	11
2.2.3 Variación de Retardo (<i>Jitter</i>)	11
2.2.4 Rechazo de Paquetes (<i>Packet Dropping</i>)	11
2.3 SOLUCIONES DE CALIDAD DE SERVICIO	12
2.3.1 Servicio <i>Best-Effort</i>	14
2.3.2 Servicios Integrados (<i>IntServ</i>).....	15
2.3.2.1 Implantación de Servicios Integrados	16
2.3.3 Servicios Diferenciados (<i>DiffServ</i>).....	18
2.3.3.1 Tipos de Servicio en <i>DiffServ</i>	19
3 OPNET <i>Modeler</i>	23

3.1	INTRODUCCIÓN A LOS SIMULADORES	23
3.2	TIPOS DE SIMULACIONES	25
3.3	OPNET <i>MODELER</i>	26
3.3.1	Qué es OPNET <i>Modeler</i>	26
3.3.2	Cómo funciona OPNET <i>Modeler</i>	27
3.3.2.1	Fases para la Realización de una Simulación en OPNET <i>Modeler</i>	33
3.3.3	Partes de OPNET <i>Modeler</i>	34
3.3.3.1	<i>Project Editor</i>	34
3.3.3.2	<i>Node Editor</i>	36
3.3.3.3	<i>Process Model Editor</i>	38
3.3.3.4	<i>Link Model Editor</i>	40
3.3.3.5	<i>Path Editor</i>	42
3.3.3.6	<i>Packet Format Editor</i>	43
3.3.3.7	<i>Probe Editor</i>	44
3.3.3.8	<i>Simulation Sequence Editor</i>	44
3.3.3.9	<i>Analysis Tool</i>	45
3.3.4	Simulación <i>DES</i>	46
4	<i>WiMAX</i> [19]	49
4.1	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	50
4.2	COMPONENTES DE UNA RED <i>WiMAX</i>	51
4.3	VARIANTES ESTÁNDARES <i>WiMAX</i>	52
4.4	SOPORTE DE CALIDAD DE SERVICIO EN <i>WiMAX</i>	53
4.4.1	Configuración <i>WiMAX</i>	54
4.4.2	Topologías Implementadas en <i>WiMAX</i>	56
4.4.2.1	Topología Punto Multi Punto (<i>PMP</i>).....	57

4.4.2.2	Topología Multi Salto (<i>MH</i>).....	58
4.4.3	Modulaciones y Codificaciones Implementadas en <i>WiMAX</i>	59
4.4.4	Capacidad de Servicio	61
4.4.5	Movilidad.....	62
4.4.5.1	<i>Handover</i> Homogéneo	63
4.4.5.2	<i>Handover</i> en una Red <i>IEEE 802.16</i>	64
4.4.5.3	<i>Handoff</i> Forzado	65
4.4.5.4	<i>Access Service Network (ASN)</i>	65
4.4.6	Descripción de las Capas <i>MAC</i> y <i>PHY</i> de <i>WiMAX</i>	67
4.4.6.1	Capa <i>MAC</i> de <i>WiMAX</i>	67
4.4.6.2	<i>MAC Service Specific Convergence Sublayer (CS)</i>	68
4.4.6.3	<i>MAC Common Part Sublayer (CPS)</i>	69
4.4.6.4	<i>Security (Privacy) Sublayer</i>	70
4.4.7	Capa <i>PHY</i> de <i>WiMAX</i>	71
5	DESARROLLO DE LA TESIS	72
5.1	INVESTIGACIÓN y DOCUMENTACIÓN	73
5.2	FAMILIARIZACIÓN SOFTWARE SIMULACIÓN	73
5.2.1	Objetos Requeridos para Desplegar una Red <i>WiMAX</i>	74
5.3	ESTUDIO RELACIÓN QoS MULTICAPA	77
5.4	IMPLEMENTACIÓN RELACIÓN QoS MULTICAPA	81
5.5	PARAMETRIZACIÓN DE APLICACIONES PARA SOPORTE DE QoS	84
5.5.1	Tipos de Tráfico y sus Requerimientos de Calidad de Servicio	87
5.5.1.1	Tipos de Aplicaciones de Red.....	87
5.5.1.2	Aplicaciones Elásticas y no Elásticas	87
5.5.2	Requerimientos de QoS.....	88

5.5.2.1	Tráfico de Audio	88
5.5.2.2	Efectos del Retardo (<i>Delay</i>) en la Voz.....	89
5.5.2.3	Probabilidad de Reposición de Paquetes.....	89
5.5.2.4	Tráfico de Video	90
5.5.2.5	Tráfico de Datos.....	91
5.6	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	93
5.6.1	QoS Multicapa con Aplicaciones Voz y <i>FTP</i>	93
5.6.1.1	Objetivo	93
5.6.1.2	Descripción del Escenario	94
5.6.1.3	Variables a Medir	97
5.6.1.4	Metodología.....	98
5.6.1.5	Análisis de Resultados.....	98
5.6.2	QoS Multicapa con Aplicaciones Voz y Tráfico <i>Web</i>	113
5.6.2.1	Objetivo	113
5.6.2.2	Descripción del Escenario	114
5.6.2.3	Variables a Medir	117
5.6.2.4	Metodología.....	117
5.6.2.5	Análisis de Resultados.....	118
5.6.3	QoS Multicapa con Aplicaciones Video y Correo Electrónico	124
5.6.3.1	Objetivo	124
5.6.3.2	Descripción del Escenario	124
5.6.3.3	Variables a Medir	128
5.6.3.4	Metodología.....	128
5.6.3.5	Análisis de Resultados.....	129
5.6.4	Movilidad con <i>Handoff</i> Forzado	135

5.6.4.5	Análisis de resultados.....	140
5.6.5	Movilidad con <i>Access Service Network (ASN)</i>	162
5.6.5.1	Objetivo	162
5.6.5.2	Descripción del Escenario.....	162
5.6.5.3	Variables a Medir	165
5.6.5.4	Metodología	166
5.6.5.5	Análisis de Resultados	166
5.6.4.1	Objetivo	135
5.6.4.2	Descripción del escenario.....	135
5.6.4.3	Variables a medir	139
5.6.4.4	Metodología.....	140

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Datagrama <i>IPv4</i>	7
Figura 2. Dirección <i>Internet</i>	8
Figura 3 . Implantación del Modelo de Referencia para <i>Routers</i>	17
Figura 4. Jerarquía de diseño en <i>OPNET Modeler</i>	27
Figura 5. Funcionamiento del modelo de nodos.	28
Figura 6. Funcionamiento del módulo de nodos	30
Figura 7. Esquema de las fases de la simulación	33
Figura 8. Visualización de resultados.....	35
Figura 9. Formato <i>Project Editor</i>	35
Figura 10. <i>Node Editor</i>	37
Figura 11. Formato del <i>Process Model Editor</i>	38
Figura 12 . <i>Enter executives/ Exit executives</i>	39
Figura 13. <i>Link Model Editor</i>	41
Figura 14. <i>Path Editor</i>	42
Figura 15. <i>Packet Format Editor</i>	43
Figura 16. <i>Probe Editor</i>	44
Figura 17. <i>Simulation Sequence Editor</i>	45
Figura 18. <i>Analysis Tool</i>	45
Figura 19. Proceso Simulación <i>DES</i>	48
Figura 20. Componentes de una red <i>WiMAX</i>	52
Figura 21. <i>MAC Service Class Definitions</i>	55
Figura 22. Topología Punto Multi Punto.....	57
Figura 23. Topología Multi Salto	59
Figura 24. Modulaciones usadas en <i>WiMAX</i> de acuerdo a la calidad de la señal.	60
Figura 25. Estándar <i>IEEE 802.16</i> comparado con otros estándares <i>IEEE 802</i>	61
Figura 26. Evolución de los estándares <i>WiMAX</i>	63
Figura 27. Clasificación de tráfico en los nodos <i>BS</i> y <i>SS</i> en la sub capa <i>CS</i>	68
Figura 28. Clasificador de paquetes y asignación de prioridad en las colas.....	70
Figura 29. Esquema sub capas <i>MAC</i> y <i>PHY</i> del estándar <i>IEEE 802.16</i>	71
Figura 30. Escenario de prueba <i>WiMAX</i>	72
Figura 31. <i>WiMAX Config Node</i>	75

Figura 32. <i>Application Config Node</i>	75
Figura 33. <i>Profile Config Node</i>	76
Figura 34. <i>Task Config Node</i>	77
Figura 35. <i>MAC Service Class Definitions Table</i>	79
Figura 36. <i>Classifier Definitions Table</i>	79
Figura 37. <i>Traffic Characteristics para Gold</i>	81
Figura 38. <i>Traffic Characteristics para Bronze</i>	81
Figura 39. Descripción del escenario	94
Figura 40. Tráfico incidente voz sobre conexiones <i>UGS @ 64 Kbps</i> en el nodo <i>SS_1_1</i>	99
Figura 41. Ancho de banda tráfico voz sobre conexiones <i>UGS @ 64 Kbps</i> en el nodo <i>SS_1_1</i>	100
Figura 42. Paquetes de Voz rechazados con <i>UGS @ 64 Kbps</i> en el nodo <i>SS_1_1</i>	101
Figura 43. Retardo Paquetes de Voz Extremo-Extremo con <i>UGS @ 64 Kbps</i> red <i>WiMAX</i>	102
Figura 44. Variación Retardo Paquetes de Voz con <i>UGS @ 64 Kbps</i> red <i>WiMAX</i>	103
Figura 45. Retardo tráfico <i>FTP</i> extremo-extremo en la red <i>WiMAX</i>	104
Figura 46. Rendimiento tráfico de voz sobre conexiones <i>UGS @ 96 Kbps</i> en el nodo <i>SS_1_1</i>	105
Figura 47. Tráfico voz rechazados con <i>UGS @ 96 Kbps</i> en la red <i>WiMAX</i>	106
Figura 48. Retardo Paquetes de Voz Extremo-Extremo con <i>UGS @ 96 Kbps</i> en la red <i>WiMAX</i>	107
Figura 49. Variación Retardo Paquetes de Voz con <i>UGS @ 96 Kbps</i> en la red <i>WiMAX</i>	107
Figura 50. Trafico <i>FTP</i> incidente gradual en la red <i>WiMAX</i>	108
Figura 51. Encolamiento progresivo paquetes <i>FTP</i> en la red <i>WiMAX</i>	109
Figura 52. Tráfico <i>FTP</i> transmitido red <i>WiMAX</i>	110
Figura 53. Retardo Paquetes de Voz Extremo-Extremo con <i>ertPS @ 96 Kbps</i> ..	111
Figura 54. Comportamiento Trafico <i>FTP</i> red <i>WiMAX</i>	112
Figura 55. Disminución retardo extremo-extremo tráfico <i>FTP</i> red <i>WiMAX</i>	113
Figura 56. Descripción del escenario	114
Figura 57. Comportamiento tráfico voz nodo <i>SS_1_1</i>	118
Figura 58. Retardo extremo-extremo tráfico red <i>WiMAX</i>	119
Figura 59. Variación retardo tráfico voz red <i>WiMAX</i>	120
Figura 60. Comportamiento tráfico <i>HTTP</i> red <i>WiMAX</i>	121
Figura 61. Retardo extremo-extremo tráfico <i>HTTP</i> red <i>WiMAX</i>	122
Figura 62. Encolamiento tráfico red <i>WiMAX</i>	123

Figura 63. Tráfico rechazado red <i>WiMAX</i>	123
Figura 64. Descripción Escenario	124
Figura 65. Rendimiento tráfico video red <i>WiMAX</i>	129
Figura 66. Retardo <i>ETE (End To End)</i> tráfico video en la red <i>WiMAX</i>	130
Figura 67. <i>Jitter</i> tráfico de video red <i>WiMAX</i>	131
Figura 68. Comportamiento trafico correo electrónico red <i>WiMAX</i> en el nodo SS_5_1.....	132
Figura 69. Retardo extremo-extremo tráfico correo electrónico red <i>WiMAX</i>	133
Figura 70. Encolamiento paquetes red <i>WiMAX</i>	134
Figura 71. Tráfico rechazado en la red <i>WiMAX</i>	134
Figura 72. Escenario Movilidad con <i>Handoff</i> forzado	135
Figura 73. <i>BS ID</i> nodos <i>SS</i> celda azul antes <i>Handoff</i> forzado	141
Figura 74. Comportamiento tráfico nodos celda azul antes <i>Handoff</i> forzado (<i>bps</i>)	142
Figura 75. Cambio <i>BS ID</i> nodos <i>MS</i> celda verde antes <i>Handoff</i> forzado	143
Figura 76. Comportamiento tráfico nodos celda verde antes <i>Handoff</i> forzado (<i>bps</i>)	144
Figura 77. Cambio <i>BS ID</i> nodos <i>MS</i> celda roja antes <i>Handoff</i> forzado	145
Figura 78. Comportamiento tráfico nodos celda roja antes <i>Handoff</i> forzado	146
Figura 79. Variación ancho de banda estaciones base antes <i>Handoff</i> forzado ...	147
Figura 80. Comportamiento tráfico voz red <i>WiMAX</i> antes <i>Handoff</i> forzado.....	148
Figura 81. Proceso de <i>Handoff</i> forzado red <i>WiMAX</i>	149
Figura 82. Código para verificar parámetros de la <i>BS</i> destino	151
Figura 83. <i>BS ID</i> nodos celda azul después de <i>Handoff</i> forzado	153
Figura 84. Comportamiento tráfico nodos celda azul con <i>Handoff</i> forzado (<i>bps</i>)	154
Figura 85. Comportamiento tráfico nodos celda verde con <i>Handoff</i> forzado (<i>bps</i>)	155
Figura 86. Comportamiento tráfico nodos celda roja con <i>Handoff</i> forzado (<i>bps</i>) .	155
Figura 87. Variación ancho de banda estaciones base después <i>Handoff</i> forzado	158
Figura 88. Retardo extremo-extremo paquetes voz red <i>WiMAX</i>	159
Figura 89. Variación tráfico voz nodo <i>SS_Azul_6</i>	160
Figura 90. Variación tráfico voz nodos celda azul	160
Figura 91. Rendimiento red <i>WiMAX</i> después <i>Handoff</i> forzado	161
Figura 92. Descripción del escenario	162
Figura 93. Tráfico voz incidente red <i>WiMAX</i> nodo <i>MS_2_1</i>	167
Figura 94. Tráfico voz transmitido red <i>WiMAX</i> nodo <i>MS_2_1</i>	167
Figura 95. Retardo extremo-extremo trafico de voz en la red <i>WiMAX</i>	168
Figura 96. Variación tráfico de voz en la red <i>WiMAX</i>	169

Figura 97. Encolamiento trafico red <i>WiMAX</i>	170
Figura 98. Trafico rechazado red <i>WiMAX</i>	170
Figura 99. Movilidad con <i>ASN</i>	171
Figura 100. Parámetros movilidad nodo <i>MS_5_1</i> en la red <i>WiMAX</i>	173
Figura 101. Retardo extremo-extremo trafico voz nodo <i>MS_5_1</i>	174
Figura 102. Retardo extremo-extremo trafico voz nodo <i>MS_1_1</i>	175
Figura 103. Parámetros movilidad nodo <i>MS_1_1</i> en la red <i>WiMAX</i>	177
Figura 104. Trayectoria Nodo <i>MS_1_1</i>	178
Figura 105. Modelo esquemático del modelo <i>WiMAX</i>	186
Figura 106. Funcionalidad del proceso principal y el proceso derivado	187
Figura 107. Admisión de un flujo de servicio activando un estado de flujo de servicio en el generador <i>MAP</i>	190
Figura 108. Esquemático del <i>MAP Generator</i>	194
Figura 109. Algoritmo del <i>MAP Generation</i>	195
Figura 110. Proceso de decodificación del <i>UL-MAP</i> en el nodo <i>SS</i>	196

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 . Estructura del campo ' <i>Differentiated Services</i> '	18
Tabla 2. Grupos de ' <i>Code Points</i> ' del campo <i>DS</i>	18
Tabla 3. ' <i>Code Points</i> ' utilizados en el servicio <i>Assured Forwarding</i>	19
Tabla 4. Estructura del campo 'Tipo de Servicio'.	21
Tabla 5. Correspondencia del campo precedencia con los servicios <i>DiffServ</i>	22
Tabla 6. Módulos del <i>Node Editor</i>	29
Tabla 7. Conexiones del <i>Node Editor</i>	30
Tabla 8. Opciones del <i>Process Model</i>	32
Tabla 9. Codificaciones y modulaciones usadas en <i>WiMAX</i>	60
Tabla 10. Descripción escenarios tesis	83
Tabla 11. Definición parámetros de <i>QoS</i> usados en <i>WiMAX</i>	85
Tabla 12. Caracterización aplicaciones relacionadas con parámetros de <i>QoS</i> en <i>WiMAX</i>	86
Tabla 13. Relación parámetros multicapa aplicación Voz	92
Tabla 14. Relación parámetros multicapa aplicación Video (<i>VCR Quality Video</i>) .	92
Tabla 15. Relación parámetros multicapa aplicación <i>FTP (File Transfer Protocol)</i>	92
Tabla 16. Mapeo implementado.....	95
Tabla 17. Estadísticas usadas en el escenario	97
Tabla 18. Modificación mapeo implementado	110
Tabla 19. Mapeo implementado.....	115
Tabla 20. Estadísticas usadas en el escenario	117
Tabla 21. Mapeo implementado.....	125
Tabla 22. Estadísticas usadas en el escenario	128
Tabla 23. Mapeo implementado.....	138
Tabla 24. Estadísticas usadas en el escenario	140
Tabla 25. Mapeo implementado.....	163
Tabla 26. Estadísticas usadas en el escenario	165
Tabla 27. <i>WimaxT_IE</i>	208
Tabla 28. <i>WimaxT_IE_Dim_Type1</i>	209
Tabla 29. <i>WimaxT_IE_Dim_Type2</i>	209
Tabla 30. <i>WimaxT_IE_Dim_Type3</i>	209

Tabla 31. <i>WimaxT_Map</i>	211
Tabla 32. <i>wimax_mgmt_map</i>	212
Tabla 33. <i>WimaxT_Control_Argmem</i>	213
Tabla 34. Especificaciones Técnicas del Nodo <i>BS</i>	215
Tabla 35. Especificaciones Técnicas del Nodo <i>MS</i>	216

ANEXOS

Pág

ANEXO A

OPNET *Modeler: WiMAX Consortium Model. Software Design Document*.....186

ANEXO B

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS NODOS *BS* Y *MS* EN *WiMAX*.....215

GLOSARIO

Almacenamiento y Reenvío: Características de las redes que usan conmutadores de paquetes para reenviar paquetes. El nombre proviene de cada conmutador de la trayectoria al destino recibe un paquete y lo almacena temporalmente en memoria. Mientras tanto, el conmutador selecciona de manera continua un paquete de la cola en memoria, lo canaliza y lo transmite a la siguiente parada.

Ancho de banda: Medida de la capacidad de un sistema de transmisión. El ancho de banda se mide en *Hertz*.

ARGMEM: *Argument Memory.*

ARQ: *Automatic repeat request*

BEGSIM: *Begin Simulation Interrupt*

Bits por segundo: Razón a la cual puede transmitir datos por una red. La cantidad de bits por segundo puede diferir de la razón de baudios puesto que es posible codificar más de 1 *bit* en un solo baudio.

BS: *Base Station* (Estación Base)

Carga: De manera general, datos transportados en un paquete. La carga de un cuadro son los datos del cuadro; La carga de un datagrama es el área de datos del datagrama.

CBQ: *Class Based Queuing*, Colas basadas en clases.

CBR: *Constant Bit Rate*, Tasa constante de *bits*.

Child Process: Proceso derivado

CID: *Connection Identifier*

Congestionamiento: Condición en la que cada paquete que se envía por la red experimenta un retardo excesivo debido a que esta se encuentra sobrecargada de paquetes. A menos que el software del protocolo detecte el congestionamiento y reduzca la razón de envío de los paquetes, la red puede experimentar un colapso por congestionamiento.

Datagrama IP: Forma de un paquete enviado por una inter-red *TCP/IP*. Cada datagrama tiene una cabecera que identifica tanto al transmisor como al receptor, seguida de datos.

Dirección Destino: Dirección en un paquete que especifica el destino último del paquete. En un cuadro de hardware, la dirección destino, debe ser una dirección de hardware. En un datagrama IP, la dirección destino debe ser una dirección *IP*.

Dirección IP: Dirección de 32 o 128 bits (*IPV4* o *IPv6*) asignada a una computadora que usa protocolos *TCP/IP*. El transmisor debe conocer la dirección IP de la computadora destino antes de enviar un paquete.

DS: *Differentiated Services*, Servicios Diferenciados.

DSCP: *Differentiated Services Code Point*.

E/S (I/O): Entrada/Salida (*Input/Output*)

ECN: *Explicit Congestion Notification*, Notificación de congestión explícita.

FIFO: *First In First Out*, Primero en entrar es el Primero en salir.

FTP: *File Transfer Protocol*, Protocolo de transferencia de archivo.

Gateway: En términos de *Internet* un *Gateway* es un dispositivo que enruta los datagramas. Más recientemente utilizado para hacer referencia a cualquier dispositivo de red que traduce los protocolos de un tipo de red a los de otra red.

Host: Es un ordenador que funciona como el punto de inicio y final de las transferencias de datos. Tiene una dirección de *Internet* única (dirección *IP*) y un nombre de dominio único o nombre de host.

HTTP: *Hypertext Transfer Protocol*, Protocolo de Transferencia de Hipertexto.

IE: *Information Element*

IEEE: *Institute of Electric and Electronic Engineers*, Instituto de Ingenierías Eléctrica y Electrónica.

Internet: Conjunto de redes conectadas entre sí que abarca todo el mundo y utiliza la NFSNET como columna vertebral. *Internet* es el término específico de una inter-red o de un conjunto de redes.

IntServ: *Integrated Services Internet QoS Model*, Modelo de Calidad de Servicios Integrados de *Internet*.

IP: *Internet Protocol*, Protocolo de *Internet*. Protocolo que define tanto el formato de los paquetes usados en una *Internet TCP/IP* como el mecanismo de enrutamiento de un paquete a su destino.

ISP: *Internet Service Provider*, Proveedores del Servicio de *Internet*.

ITU-T: *International Telecommunications Union – Telecommunications*, Union Internacional de Telecomunicaciones – Telecomunicaciones.

Jitter: Es un término que se refiere al nivel de variación de retardo que introduce una red.

LAN: *Local Area Network*, Red de Área Local. Red que usa tecnología diseñada para abarcar un área geográfica pequeña.

MAC: *Media Access Control*, Control de Acceso al Medio.

MAP: *Multiple Access Protocol*

MAP: *Multiple Access Protocol*

MBONE: *Multicast BackBone*, Red Troncal de Multidifusión.

Mbps: *Mega bits per second*. Millones de bits por segundo.

MS: *Mobile Station* (Estación Móvil)

NCP: *Network Control Protocol*, Protocolo de Control de Red.

OSI: *Open System Interconnection*, Modelo de Referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos.

Paquete: Fragmento de dato pequeño y auto contenido enviado por una red de computo. Cada paquete contiene una cabecera que identifica al transmisor y al receptor, así como los datos a entregar.

PDU: *Protocol Data Unit*, Unidad de Datos de Protocolo.

PHB: *Per Hop Behavior*, Comportamiento por Salto.

RFC: *Request For Comments*.

Root Process: Proceso principal

Router: Encaminador. Dispositivo que distribuye tráfico entre las redes. La decisión sobre a donde enviar los datos se realiza basándose en la información de nivel de red y tablas de direccionamiento. Es el nodo básico de una red *IP*

RSVP: *Resource Reservation Protocol*, Protocolo de Reservación de Recursos

SDU: *Service Data Unit*

SS: *Suscriber Station* (se asocia a *MS* en entornos móviles)

TCP: Protocolo *TCP/IP*, que proporciona a los programas de aplicación, acceso al servicio de comunicación orientado a conexión. El *TCP* ofrece una entrega confiable y de flujo controlado. El *TCP* se ajusta a las condiciones cambiantes de *Internet* adaptando su esquema de transmisión.

ToS: Tipo de Servicio.

TTL: *Time to Live*, Tiempo de Vida de un paquete en la red.

VoIP: *Voice over IP*.

WFQ: *Weighted Fair Queueing*, Colas Equitativas Ponderadas.

RESUMEN

TITULO: CALIDAD DE SERVICIO MULTICAPA EN UNA RED IP BASADA EN WIMAX

AUTOR(ES): SERGIO MANUEL RACINI BUENO
JULIETH KATHERIN ARIZA OLARTE

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): JHON JAIRO PADILLA AGUILAR

Esta tesis propone una arquitectura de calidad de servicio multicapa para el estándar IEEE 802.16 en su modo TDD (Time Division Duplexing). Se han usado unas reglas de mapeo que relacionan los parámetros de calidad de servicio (retardo, ancho de banda, variación del retardo, paquetes rechazados y encolamiento), de las capas IP y MAC de WiMAX para mejorar el rendimiento de las aplicaciones elásticas (FTP, tráfico Web, Correo Electrónico) e inelásticas (Voz y Video) ofreciendo una continuidad en la calidad de servicio extremo-extremo en una red IEEE 802.16. Para esto, se han establecido cinco escenarios de simulación en OPNET Modeler en entornos de movilidad y estáticos. En estos escenarios de simulación se muestra una mejora en el rendimiento de las aplicaciones de red modificando la relación multicapa en los parámetros de QoS en WiMAX. Estas modificaciones se realizaron en los diferentes tipos de planificadores de la capa MAC asociados al estándar IEEE 802.16 y en el campo ToS del datagrama IP.

PALABRAS CLAVES: WiMAX, IPv4, QoS, Opnet Modeler, IntServ, DiffServ, ToS.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

ABSTRACT

TITLE: MULTI-LAYER QOS IN A IP NETWORK BASED ON WIMAX

AUTHOR(S): SERGIO MANUEL RACINI BUENO
JULIETH KATHERIN ARIZA OLARTE

FACULTY: Electronic Engineering Faculty

DIRECTOR: JHON JAIRO PADILLA AGUILAR

This thesis proposes a multi-layer quality of service architecture for the IEEE 802.16 standard in its TDD (Time Division Duplexing) mode. Some mapping rules were implemented to relate the quality of service parameters such as band width, delay, jitter, packets dropped and queuing from the IP layer to MAC layer in order to improve the performance of an elastic (FTP, e-mail and web traffic) and inelastic applications (voice and video) through offering an end-to-end continuity of service in a IEEE 802.16 network. For this purpose, five simulation scenarios were established using OPNET Modeler with both mobility and static environments. In these simulation scenarios it is proved that the improvement in performance of the network applications modifying the cross-layer relation of the quality of service parameters in WiMAX. These modifications were done on the different scheduling types of the MAC layer in the IEEE802.16 and in the datagram TOS field in the IP layer.

KEY WORDS: WiMAX, IPv4, QoS, Opnet Modeler, IntServ, DiffServ, ToS.

V° B° DEGREE PROJECT SUPERVISOR

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayor parte de la investigación y el desarrollo de las tecnologías de comunicación existentes buscan ofrecer conectividad en cualquier momento y en cualquier lugar. Es así como la industria de telecomunicaciones ha progresado para dar soporte al tráfico orientado a paquetes y soporte a la Calidad de Servicio (QoS). [1]

La tecnología *WiMAX* ha sido incorporada por la Asamblea de Radiocomunicación de la *ITU (International Telecommunication Union)* en el marco del estándar *IMT-2000 (International Mobile Telecommunications)*, que es el estándar global para las comunicaciones sin hilos de 3G. *IMT-2000* ha sido definida por un sistema de recomendaciones interdependientes de la *ITU* y constituye un importante acontecimiento para reconocer el papel que esta tecnología desempeña en las telecomunicaciones mundiales. [2]

La necesidad de llevar el acceso multiservicio a grandes velocidades a zonas no abastecidas hace que *WiMAX* no sea solo un mecanismo de competitividad sino una herramienta social que puede ser implementada en relativamente cualquier parte del mundo. [2]

Para soportar servicios multimedia con *Broadband Wireless Access (BWA)*, la Calidad de Servicio (QoS) de la capa *IP* es una de las claves del éxito. El estándar *IEEE 802.16* provee cobertura amplia, altas velocidades de transferencia de datos y permite transmisión sin línea de vista [3]. En el estándar *IEEE 802.16* la calidad de servicio es soportada en la capa 2 con cuatro tipos de servicio (*Unsolicited*

Grant Service (UGS) - Real-time Polling Service (rtPS) - Non-Real-time Polling Service (nrtPS) – Best Effort (BE)). Para mejorar el rendimiento de la red *IEEE 802.16*, se debe considerar una interacción entre la calidad de servicio de la capa *IP* y la calidad de servicio de la capa *MAC* [3]. Sin una *QoS* competitiva y sofisticada, aplicaciones tales como voz y video, simplemente no funcionarían como deberían.

Por todo lo anterior, esta tesis tiene como objetivo simular parámetros de Calidad de Servicio multicapa en el estándar *IEEE 802.16* en diferentes escenarios donde se pueda analizar el rendimiento y eficiencia de las aplicaciones elásticas y no elásticas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar y evaluar mediante simulaciones el rendimiento del soporte de Calidad de Servicio de una red *IP* basada en tecnología *WiMAX* en diferentes escenarios.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Relacionar mediante un proceso de mapeo (relación) la integración de calidad de servicio (QoS) entre las capas *IP* y *MAC*, para una red con tecnología *WiMAX*.

Implementar reglas de mapeo (relación) que permitan parametrizar aplicaciones tales como voz y video, en redes *WiMAX* con la combinación obtenida en el objetivo anterior.

Analizar la capacidad de una red *WiMAX* para entregar una adecuada Calidad de Servicio Multicapa a aplicaciones elásticas (*http*, *FTP*, *e-mail*) y no elásticas (voz y video) en diferentes escenarios (red multi punto con usuarios estáticos y móviles).

1 PROTOCOLO DE *INTERNET* VERSION 4 [4]

Debido a que este proyecto trabaja con redes *IP*, es necesario entender los conceptos básicos de este protocolo.

1.1 GENERALIDADES

IP es el mecanismo de transmisión utilizado por los protocolos *TCP/IP*. Es un protocolo basado en datagramas sin conexión y no fiable, ofrece un servicio de mejor entrega posible (*Best Effort*). Por mejor entrega posible, se quiere indicar que *IP* no ofrece comprobaciones ni seguimientos. *IP* asume que los niveles subyacentes no son fiables e intenta que la transmisión llegue a su destino. Las transmisiones a través de redes físicas pueden ser destruidas por varios motivos. El ruido puede causar errores en los *bits* durante la transmisión por el medio, un encaminador congestionado puede descartar un datagrama si es incapaz de retransmitirlo antes que se supere un límite de tiempo; el encaminamiento puede hacer que los datagramas entren a un bucle y sean destruidos finalmente, y los enlaces desactivados pueden hacer que no haya camino para alcanzar al destino.

IP transporta los datos en paquetes denominados datagramas, cada uno de los cuales es transportado de forma independiente. Los datagramas pueden viajar a través de encaminadores diferentes y llegar fuera de secuencia o duplicados. *IP* no se encarga de realizar un seguimiento de los encaminadores ni ofrece facilidades para reordenar los datagramas una vez recibidos. Debido a que es un servicio sin conexión, *IP* no crea circuitos virtuales para la entrega. No hay un establecimiento de llamada que indique al receptor la llegada de una transmisión.

La funcionalidad limitada de *IP* no debería ser considerada como una debilidad, sin embargo, *IP* ofrece funciones de transmisión básicas y deja la libertad al usuario para añadir sólo aquellas facilidades necesarias para una aplicación concreta, permitiendo por tanto una máxima eficiencia y flexibilidad.

1.1.1 Partes del Datagrama IPv4

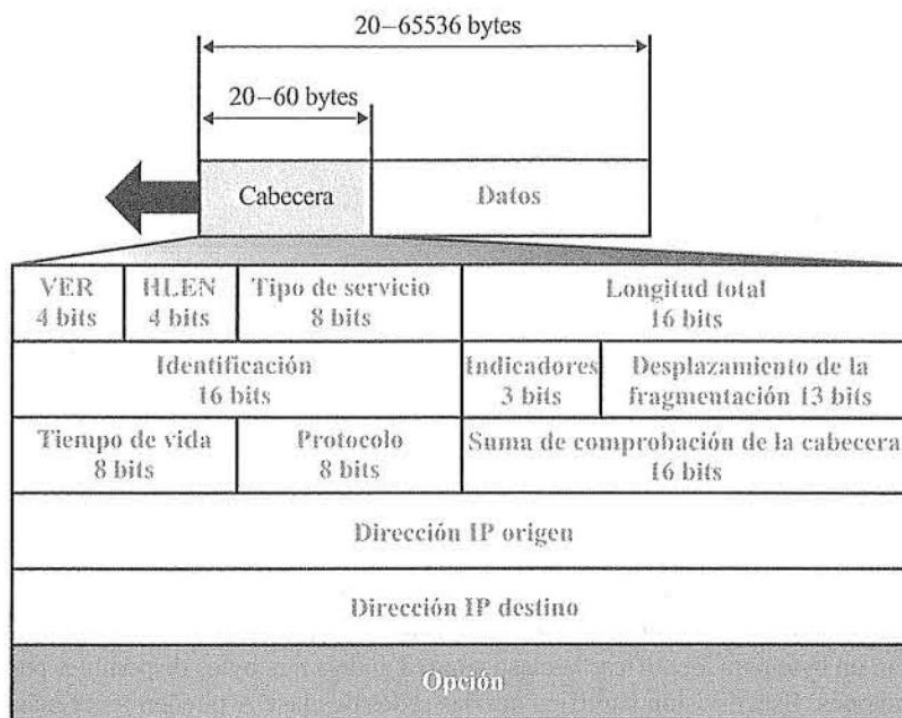
Los paquetes en el nivel *IP* se denominan datagramas. La figura 1 (datagrama *IPv4*), muestra el formato de un datagrama *IP*. Un datagrama es un paquete de longitud variable (hasta 65.536 *bytes*), que consta de dos partes: una cabecera y datos. La cabecera puede incluir de 20 a 60 *bytes* y contiene información esencial para el encaminamiento y la entrega. Es habitual en *TCP/IP* mostrar la cabecera en secciones de cuatro *bytes*. A continuación se realiza una breve descripción de cada campo:

- **Versión:** El primer campo define el número de versión de *IP*. la versión actual es la 4 (*IPv4*), con un valor binario de 0100.
- **Longitud de la cabecera:** Este campo define la longitud de la cabecera en múltiplos de cuatro *bytes*. Cuatro *bits* pueden representar un número entre 0 y 15, que cuando se multiplica por 4 da un máximo de 60 *bytes*.
- **Tipo de servicio:** Este campo define la forma en la que se debería manejar el datagrama. Incluye *bits* que definen la prioridad del datagrama. También contiene *bits* que especifican el tipo de servicio que el emisor desea como el nivel de prestaciones, fiabilidad y retardo.

- **Longitud total:** El campo con la longitud total define la longitud total del datagrama *IP*. Es un campo de dos *bytes* (16 *bits*), que puede definir hasta 65.536 *bytes*.
- **Identificación:** Este campo se utiliza en la fragmentación. Un datagrama, cuando pasa a través de redes diferentes, puede dividirse en fragmentos que coincidan con el tamaño de una trama de red. Cuando esto ocurre, cada fragmento es identificado con un número de secuencia en este campo.
- **Indicadores:** Los *bits* de este campo están relacionados con la fragmentación (el datagrama puede estar o no fragmentado; puede ser el primero, el último fragmento, etc.).
- **Desplazamiento del fragmento:** El desplazamiento del fragmento es un puntero que muestra el desplazamiento de los datos en el datagrama original (si se fragmenta).
- **Tiempo de vida:** El campo de vida define el número de saltos que un datagrama puede dar antes de que sea descartado. La estación origen, cuando crea el datagrama, fija este campo a un valor de 1. Si el valor se hace 0 antes que el datagrama haya alcanzado el destino final, se descarta el datagrama. Esto evita que un datagrama vuelva o viaje de forma indefinida entre caminadores.
- **Protocolo:** Este campo define el protocolo de nivel superior que se encuentra encapsulado en el datagrama (*TCP*, *UDP*, *ICMP*, etc.).
- **Suma de comprobación de la cabecera:** Este campo de 16 *bits* se utiliza para comprobar la integridad de la cabecera, no del resto del paquete.

- **Dirección origen:** El campo con la dirección origen es una dirección de internet de 4 *bytes* (32 *bits*). Identifica el origen del datagrama.
- **Dirección destino:** Este campo es una dirección de internet de 4 *bytes* (32 *bits*). Identifica el destino del datagrama.
- **Opción:** El campo de opciones ofrece más funcionalidad al datagrama *IP*. Puede transportar datos que controlan el encaminamiento, la temporización, la gestión y el alineamiento.

Figura 1. Datagrama *IPv4*



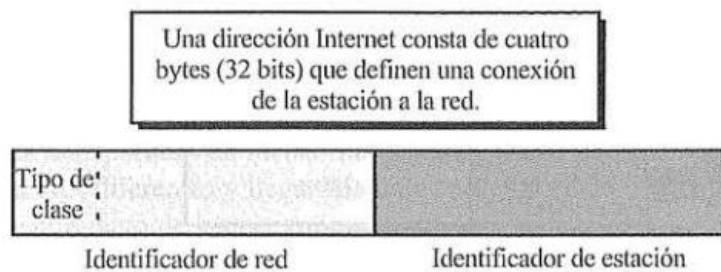
Fuente [4]

1.1.2 Direccionamiento

Además de la dirección física (contenida en la interfaz de red) que identifica el dispositivo individual, Internet requiere una convención en el direccionamiento: una dirección que identifique la conexión de una estación a la red.

Cada dirección de red, consta de cuatro *bytes* (32 *bits*), que definen tres campos: la clase, el identificador de la red y el identificador de la estación. Estas partes son de longitud variable dependiendo de las clases de direcciones.

Figura 2. Dirección *Internet*



Fuente [4].

2 CALIDAD DE SERVICIO EN INTERNET (QoS) [5]

2.1 INTRODUCCIÓN

La Internet actual, es una red que ofrece un servicio no confiable (la entrega no se garantiza) y de entrega con el mejor esfuerzo o *Best Effort* (la red trata todos los datos de igual manera y hace todo lo posible en entregar los datos, al menos que los recursos estén agotados). Con la aparición de nuevas aplicaciones sobre la Internet como voz e imagen en tiempo real, trabajo compartido en directo, reporte de diagnósticos médicos en vivo, telefonía, comando y control de sistemas remotos, entre otros, la Internet actual se ve inadecuada y es necesario que ofrezca una mejor **Calidad de Servicio (QoS)**. El concepto de QoS está relacionado con la planificación de los elementos de la red de acuerdo con la demanda de las aplicaciones, para ofrecer un mínimo nivel de garantía que satisfaga los requerimientos de tráfico: retraso de envío de los datos, variación de los retrasos, ancho de banda adecuado para el envío satisfactorio de los datos, entre otros. Dicho de otra manera, QoS se refiere a la manera que se clasifican los paquetes de datos con el único propósito de que sean tratados adecuadamente respecto a otros.

Además del servicio *Best Effort* que la Internet actual ofrece, existen otros enfoques para mejorar la QoS. El primero, utilizando **Reserva de Recursos** (Servicios Integrados, *IntServ*) [6], donde las reservas de recursos son requeridas por las aplicaciones receptoras (*receiver*) de acuerdo a ciertas políticas; aquí se define el Protocolo de Reserva de Recursos **RSVP** (Resource *ReSerVation Protocol*) [7] para suministrar la señalización requerida, ofreciendo dos tipos de servicios: Servicios Garantizados y Servicios de Carga Controlada. El segundo

enfoque, utiliza **Prioridad** (Servicios Diferenciados, **DiffServ**). En *DiffServ* el tráfico que circula por la red es clasificado de acuerdo a niveles de prioridad, para ello se suministran marcas dentro de las cabeceras de los datagramas *IP* para definir las prioridades de tráfico. Decidir cuál de los enfoques anteriores es el más adecuado para la Internet dependerá de muchos factores. Por ejemplo, una aplicación que requiere determinada **QoS** puede obtenerla incluso con el servicio convencional *Best Effort*.

2.2 PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO [5]

Las aplicaciones tradicionales, como correo electrónico, *Web*, *FTP*, etc. son transportadas por *Internet* actual con una clase de servicio muy pobre y denominada *Best Effort*. Con la aparición de nuevas aplicaciones de tiempo real es necesario mejorar la calidad de servicio. Una primera forma de enfocar la *QoS* es desde el punto de vista *cuantitativo*; es decir, saber como un usuario final de una aplicación percibe la red. Dicho de otra manera, por la satisfacción que siente un usuario al finalizar una sesión en la red. El otro enfoque es desde el punto de vista *cuantitativo*, de aquellos parámetros que están relacionados directamente con la mejora de la calidad de servicio y que al ser mejorados la red puede ofrecer una mejor calidad de servicio para aplicaciones que hoy en día son de gran importancia; videoconferencia; telefonía, control. Estos parámetros son: el ancho de banda, el retardo, la variación del retardo o *jitter* y la sensibilidad. Este tipo de parámetros son los que estudiaremos en este trabajo. A continuación se explicará cada uno de ellos.

2.2.1 Ancho de Banda (*Bandwidth*)

Es la capacidad de transmisión de una línea de comunicación expresada en *bits* por segundo (bps). Indica la capacidad máxima teórica de una conexión, pero debido a diversos factores como la presencia de varios flujos compartiendo uno o varios enlaces puede ocurrir su variación.

2.2.2 Retardo (*Delay*)

Es el tiempo que un dato tarda en atravesar la red desde el transmisor al receptor. En aplicaciones en tiempo real, como voz, retardos muy elevados degradaran el servicio, haciéndolo prácticamente inservible. Otro concepto relacionado con el retardo es la *latencia*, que se refiere a la cantidad de tiempo en que permanece un dato dentro de un encaminador.

2.2.3 Variación de Retardo (*Jitter*)

Es la variación en el retardo que sufren los paquetes con respecto al retardo medio en la red. Una variación de flujo o *jitter* de 2 milisegundos significa que los datos podrán llegar hasta 1 milisegundos antes o después respecto a su retardo promedio. Algunas aplicaciones de tiempo real (tales como la voz y el video en tiempo real), pueden ser sensibles al retardo y variación de retardo.

2.2.4 Rechazo de Paquetes (*Packet Dropping*)

El tamaño limitado de algunas colas en un planificador, incide en el rechazo de paquetes en condiciones de sobre flujo de tráfico. Con el propósito de evitar que

paquetes con alta prioridad sean descartados, mientras que los menos importantes no lo sean, los paquetes se marcan en los encaminadores o por las aplicaciones con una prioridad tipo *packet-drop*. Por ejemplo, una solución sería la de asignar una baja prioridad de descarte a los paquetes que llevan cierto tiempo viajando por la red. Esto evita que los paquetes que ya han consumido ciertos recursos de la red sean rechazados.

Otro aspecto, es si el planificador rechaza los paquetes cuando no existe espacio en la cola, ó que de alguna manera se ha reservado previamente para una aplicación con una alta prioridad. Una alternativa para esto es el método *Random Early Detection (RED)*. En este caso, algunos paquetes pueden ser rechazados aun si la cola no está llena, ya que esto garantiza algún espacio importante para los paquetes que llegan.

Cuando algunos paquetes necesitan rechazarse, se pueden descartar los que se encuentren al final de la cola. Eso no es difícil de implementar, pero no sería lo más apropiado para los paquetes que recién han llegado provenientes de conexiones con tráfico óptimo. Incluso, los paquetes al principio de la cola se pueden descartar también. Este método tiene la ventaja de que el nodo receptor informará la pérdida del paquete situado al final de la cola antes de que este sea rechazado en el encaminador. Para este caso, el control de congestión implementado en *TCP* realizará la gestión de reposición del paquete. [8]

2.3 SOLUCIONES DE CALIDAD DE SERVICIO

La Calidad de Servicio[9] de una comunicación a través de una red, se mide mediante tres aspectos importantes: la velocidad máxima de envío de información, las pérdidas de paquetes de información en la transmisión de datos, y el retardo introducido por esta transmisión. La grande eficiencia de *Internet* anteriormente se

debía a que el protocolo *IP*[10] se diseñó para dar un servicio que no garantizaba la calidad de servicio, ni la entrega de los paquetes a su destinatario, conocido como el servicio del mejor esfuerzo o “**Best Effort**” mencionado anteriormente. La gran ventaja de este servicio es su gran simplicidad, pero en momentos de congestión los encaminadores pueden perder paquetes de información. En los casos donde no hay congestión la transmisión es de buena calidad, pero cuando los paquetes llegan a un encaminador congestionado la calidad se degrada y se producen pérdidas y retrasos muy significativos.

Debido a estas congestiones surgió como solución el aumento del ancho de banda en *Internet*, pero no fue suficiente para finiquitar con este inconveniente de la red. Esto se debe a que cuando un paquete llega a un encaminador donde hay congestión, este automáticamente degrada la calidad de la transmisión sin importar que tan grande sea el ancho de banda en ese tramo de la red y en el resto de la ruta que lleva ese flujo de paquetes.

La mayoría de las aplicaciones de *Internet* utilizan el protocolo *TCP*[11] (*Transmisión Control Protocol*) para evitar la pérdida de paquetes en casos de congestión, por lo que la existencia de pérdidas de paquetes en la red nunca ha sido un problema importante. En cambio, los protocolos de las aplicaciones multimedia de *Internet* envían los flujos de audio y video como paquetes *UDP* (*User Datagram Protocol*)[12], el cual no tiene protección (como *TCP*) contra las pérdidas en la red, por lo que en este caso se degradan las conversaciones de audio y video a tal punto que no se entienden por los espacios en blanco en los archivos de audio o video. La razón por la que se usa *UDP* para la transmisión de audio y video es que introduce menor retardo que *TCP*, ya que en este caso es indispensable, pero con la desventaja de la pérdida de información [13].

Por estas razones, tanto *IETF*, como investigadores de todo el mundo, llevan tiempo trabajando en el desarrollo de técnicas que permitan controlar la Calidad

de Servicio directamente a nivel del protocolo *IP*, de forma que las aplicaciones de envío de audio y vídeo puedan disponer de calidades de servicio *IP* sin pérdidas ni retrasos significativos en la transmisión de paquetes de datos. Además, se busca que haya justicia en el consumo de los recursos de las aplicaciones que utilizan *UDP* y las que usan *TCP*.

IETF ha desarrollado dos propuestas de control de la calidad del servicio de transporte de información para la transmisión de voz y video con calidad a través de *Internet* que han alcanzado un apoyo considerable y son conocidas como *IntServ (Integrated Services)*[6] o Servicios Integrados y *DiffServ (Differentiated Services)*[14] ó Servicios Diferenciados.

2.3.1 Servicio *Best-Effort*

El Protocolo de *Internet* provee un servicio de paquetes no fiable (también llamado del *mejor esfuerzo (Best Effort)*, el cual hará lo mejor posible pero garantizando poco). *IP* no provee ningún mecanismo para determinar si un paquete alcanza o no su destino y únicamente proporciona seguridad (mediante *checksum* o sumas de comprobación) de sus cabeceras y no de los datos transmitidos. Por ejemplo, al no garantizar nada sobre la recepción del paquete, éste podría llegar dañado, en otro orden de secuencia con respecto a otros paquetes, duplicado o simplemente podría no llegar. Si se necesita fiabilidad, ésta es proporcionada por los protocolos de la capa de transporte, como *TCP*.

El Servicio de *Best Effort* es un modelo simple de servicio, en el cual una aplicación envía información cuando ella lo desea, en cualquier cantidad, sin ningún permiso requerido, y sin informar previamente a la red. La red reparte o envía la información si puede, sin asegurar ningún retraso ni fiabilidad. [9]

2.3.2 Servicios Integrados (*IntServ*) [5]

El modelo de servicios integrados está diseñado para trabajar tanto en entornos *unicast* como *multicast* e incluye dos tipos de clases de tráfico: **Carga Garantizada**, que soporta flujos de tráfico de tiempo real y que requiere un límite cuantificable de retraso; por otro lado, el servicio de **Carga Controlada**, que es una aproximación a un servicio del mejor esfuerzo sobre una red no congestionada. Un aspecto básico de este modelo es que los recursos deben ser explícitamente gestionados a fin de satisfacer los requerimientos de las aplicaciones; de esta manera, la *reserva de recursos* y el *control de admisión* son los elementos claves del servicio. Los servicios en tiempo real se sustentan en la garantía de los servicios, y la garantía muy difícilmente se consigue sin reservar recursos. Un aspecto que debe ser resaltado, es el de la prioridad. Asignar el nivel de prioridad alta a los tráficos de tiempo real podría ser adecuado. Pero se debe tener en cuenta que el uso de prioridades es un mecanismo interno de los encaminadores, no es un modelo de servicio. El éxito de la reserva de recursos reside en que los encaminadores se encuentran dispuestos a reservar recursos. Esto representa un cambio fundamental en el modelo de la *Internet* ya que en su inicio esta fue establecida bajo el concepto de potenciar a los sistemas finales.

El modelo de Servicios Integrados propugna una red única tanto para las aplicaciones de tiempo real como aquellas que no requieren en tiempo real, descartando el uso de una red exclusiva para tráfico de tiempo real. Más aún, establece el uso del protocolo *IP* para los datos de tiempo real. El uso de reservas de recursos, permitirá acceder a los servicios de la *Internet* de manera privilegiada, siendo necesario imponer políticas y controles administrativos, originando requerimientos de autenticación tanto de los usuarios, quienes hacen las reservas de recursos, como de los datagramas que usan los recursos reservados. Respecto al modelo de reserva, la arquitectura de servicios

integrados establece la creación de un protocolo que reserve recursos, para crear y mantener el estado de reserva en los *hosts* extremos y en los encaminadores a lo largo de la trayectoria del flujo. Una aplicación debe especificar la **QoS** deseada usando una lista de parámetros denominado *flowspec*. A la fecha se ha definido el protocolo **RSVP (Resource Reservation Protocol)** como parte de la arquitectura de servicios integrados. El funcionamiento del protocolo **RSVP** se puede resumir indicando que cada una de las aplicaciones del receptor envía un requerimiento de reserva de recursos a la red y esta podría o bien aceptar o rechazar el pedido. En realidad el proceso de requerimiento de reserva es más complejo; ya que es válido tanto para entornos *unicast* como *multicast* y las aplicaciones pueden requerir diferentes niveles de **QoS**.

2.3.2.1 Implantación de Servicios Integrados [5]

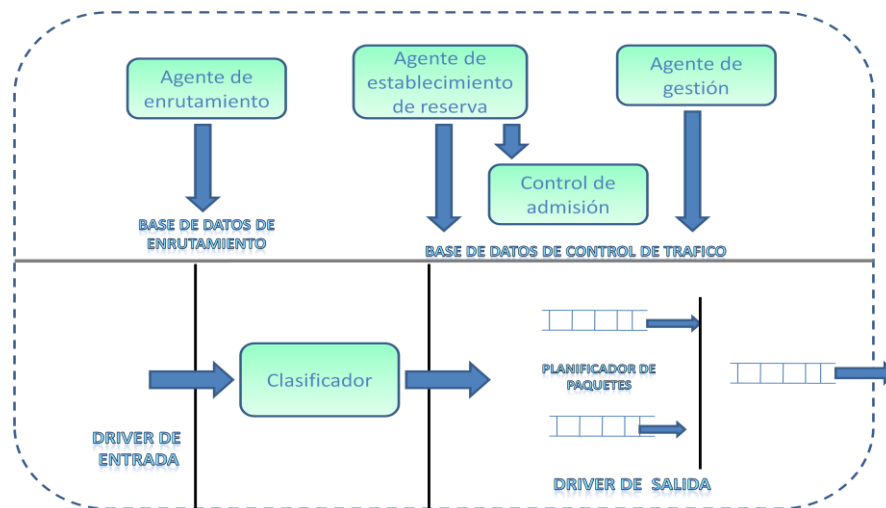
En la *Internet* actual el protocolo *IP (Internet Protocol)* trata a todos los datagramas de manera igual, de tal manera que cada datagrama recibe la misma **QoS** y son típicamente enviados usando una cola *FIFO* (primero en entrar primero en salir). En general, ante la llegada de un datagrama, se debe seleccionar una ruta adecuada por donde se enviará este datagrama hacia su destino final. Adicionalmente un encaminador debe reordenar el datagrama con respecto a otros datagramas que están esperando ser enviados. Para los Sistemas Integrados, los encaminadores deben asignar una adecuada **QoS** para cada flujo y su implantación requiere de tres componentes: planificador de paquetes, clasificador de paquetes y control de admisión. En la figura 3 se ilustran estos componentes.

- **Planificador de Paquetes:** un planificador reordena la cola de salida para la transmisión de los paquetes. Es decir, gestiona el envío de diferentes flujos de datagramas usando un grupo de colas y temporizadores. Algunos

de los más conocidos son: *PQ (Priority Queueing)*, *WRR (Weighed Round Robin)* y *WFQ (Weighed Fair Queueing)*. *WFQ* es el utilizado en el estándar de *IntServ*.

- **Clasificador de paquetes:** cada datagrama debe ser relacionado con alguna clase o flujo, de tal manera que todos los datagramas de un mismo flujo tendrán el mismo tratamiento por parte del planificador de paquetes. Esta relación es realizada por el *clasificador de paquetes*.
- **Control de Admisión:** Ejecuta los algoritmos de decisión que un encaminador usa para determinar si a un nuevo flujo se puede otorgar un requerimiento de **QoS** sin alterar los requerimientos ya existentes.

Figura 3 . Implantación del Modelo de Referencia para *Routers*



Fuente [5]

2.3.3 Servicios Diferenciados (*DiffServ*)

La arquitectura *DiffServ* [15] se basa en la idea de que la información sobre calidad de servicio se almacena en los paquetes mas no en lo encaminadores. Esta es la diferencia fundamental con *IntServ* y es la que permite implementar una calidad de servicio escalable a cualquier cantidad de flujos.

Para escribir la información sobre la calidad de servicio de cada paquete se utiliza un campo de un byte en la cabecera denominado *DS (Differentiated Services)*[14]. El campo *DS* está estructurado como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 . Estructura del campo '*Differentiated Services*'.

Subcampo	Longitud (<i>bits</i>)
<i>DSCP(Differentiated Services Code Point)</i>	6
<i>ECN(Explicit Congestion Notification)</i>	2

Fuente: [15]

El subcampo *ECN (Explicit Congestion Notification)* tiene que ver con la notificación de situaciones de congestión. En cuanto al subcampo *DSCP (Differentiated Services Code Point)*, este permite definir en principio hasta 64 posibles categorías de tráfico, aunque en la práctica se utilizan menos. Los valores de *DSCP* se dividen en tres grupos. (Ver Tabla 2)

Tabla 2. Grupos de '*Code Points*' del campo *DS*.

Codepoint	Posibles Valores	Uso
Xxyy0	32	Estándar
xxxx11	16	Local/Experimental
xxxx01	16	Reservado

Fuente: [15]

Así, se contemplan 32 posibles categorías de paquetes, correspondientes a los cinco primeros *bits* del campo *DS*.

2.3.3.1 Tipos de Servicio en DiffServ

A continuación se definen los tipos de servicio en *DiffServ*:

- **Servicio ‘*Expedited Forwarding*’**: Este servicio es el de mayor calidad. Debe garantizar un caudal mínimo, una tasa máxima de pérdida de paquetes, un retardo medio máximo y un *jitter* máximo. El valor del subcampo *DSCP* relacionado con este servicio es ‘101110’.
- **Servicio ‘*Assured Forwarding*’**: Este servicio asegura un trato preferente, pero no garantiza caudales, retardos, etc. Se definen cuatro clases posibles asignándole a cada clase una cantidad de recursos en los encaminadores (ancho de banda, espacio en buffers, etc.). La clase se indica en los tres primeros *bits* del *DSCP*. Para cada clase se definen tres categorías de descarte de paquetes (probabilidad alta, media y baja) que se especifican en los dos *bits* siguientes (cuarto y quinto). Existen por tanto 12 valores de *DSCP* diferentes asociados con este tipo de servicio, estos se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. ‘*Code Points*’ utilizados en el servicio *Assured Forwarding*.

	Precedencia	de	descarte
Clase	Baja	Media	Alta
4	10001	10010	10011
3	01101	01110	01111
2	01001	01010	01011
1	00101	00110	00111

Fuente: [15]

Se puede imaginar la prioridad de descarte como algo equivalente al *bit* de *Frame Relay* o al *bit CLP (Cell Loss Priority)* de *ATM (Asynchronous Transfer Mode)*, solo que en este caso se pueden marcar tres prioridades de descarte diferentes en vez de dos. En muchas implementaciones se ignora el quinto *bit* del campo *DSCP*,

con lo que las precedencias mediana y alta son equivalentes. En estos casos el cuarto *bit* del *DSCP* desarrolla un papel equivalente al *bit DE* de *Frame Relay* o al *CLP* de *ATM*[16].

En el servicio *Assured Forwarding* el proveedor puede aplicar políticas de tráfico al usuario, y si este excede lo pactado el proveedor puede descartar paquetes, o bien aumentar la precedencia de descarte.

- **Servicio *Best Effort*:** Este servicio se caracteriza por tener ceros en los tres primeros *bits* del *DSCP*. En este caso los dos *bits* restantes pueden utilizarse para marcar una prioridad, dentro del grupo '*best-effort*'. En este servicio no se ofrece ningún tipo de garantías.

El servicio *Expedited Forwarding* es aproximadamente equivalente al Servicio Garantizado de *IntServ*, mientras que el *Assured Forwarding* corresponde más o menos al Servicio de Carga Controlada de *IntServ*.

Algunos *ISP* (*Internet Service Provider*) ofrecen los servicios denominados 'olímpicos' con categorías denominadas, oro, plata y normal (o tiempo-real, negocios y normal). Generalmente estos servicios se basan en las diversas clases del servicio *Assured Forwarding*.

El campo *DS* es una incorporación reciente en la cabecera *IP*. Anteriormente existía en su lugar un campo denominado *ToS* o 'Tipo de Servicio que tenía la estructura que se observa en la Tabla 4 [17].

Tabla 4. Estructura del campo 'Tipo de Servicio'.

Subcampo	Longitud (<i>bits</i>)
Precedencia	3
<i>Flags D, T, R, C</i>	4
Reservado	1

Fuente: [15]

El sub campo 'Precedencia' permitía especificar una prioridad entre 0 y 7 para el paquete (7 máxima prioridad). Este campo es en cierto modo el antecesor del campo *DS*. A continuación se encontraba un sub campo compuesto por cuatro *bits* que actuaban como indicadores o '*flags*' mediante los cuales el usuario podía indicar sus preferencias respecto a la ruta que seguiría el paquete. Los *flags* denominados *D*, *T*, *R* y *C* permitían indicar si se prefería una ruta con servicio de bajo retardo (*D=Delay*), elevado rendimiento (*T=Throughput*), elevada fiabilidad (*R=Reliability*) o bajo costo (*C=Cost*). El campo *ToS* ha sido muy impopular ya que el sub campo precedencia se ha implementado muy raramente en los encaminadores. En cuanto a las banderas *D*, *T*, *R*, y *C*, prácticamente no se han utilizado y su inclusión en la cabecera *IP* ha sido muy criticada. Estos problemas facilitaron evidentemente la 'transformación' del campo *ToS* en el *DS*, aunque existen todavía encaminadores en *Internet* que interpretan este campo con su antiguo significado de campo *ToS*. Dado que *DiffServ* casi siempre utiliza solo los tres primeros *bits* del *DSCP* para marcar los paquetes, y que los servicios de mas prioridad, como es el caso del Expedited Forwarding, se asocian con los valores más altos de esos tres *bits*, en la práctica hay bastante compatibilidad entre el nuevo campo *DSCP* del byte *DS* y el antiguo campo de Precedencia del byte *ToS*, como puede verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Correspondencia del campo precedencia con los servicios *DiffServ*.

Valor Campo Precedencia	Servicio <i>DiffServ</i> correspondiente
7	Reservado
6	Reservado
5	<i>Expedited Forwarding</i>
4	<i>Assured Forwarding Clase 4</i>
3	<i>Assured Forwarding Clase 3</i>
2	<i>Assured Forwarding Clase 2</i>
1	<i>Assured Forwarding Clase 1</i>
0	<i>Best Effort</i>

Fuente: [15]

Evidentemente esta compatibilidad no es accidental. Tradicionalmente el campo Precedencia no hacía uso de los dos niveles de prioridad más altos, que quedaban reservados para mensajes de gestión de red, como los paquetes del protocolo de encaminamiento. En *DiffServ* se han reservado también los dos valores más altos de los tres primeros *bits*, con lo que se mantiene la compatibilidad con el campo precedencia.

3 OPNET Modeler

(*Optimized Network Engineering Tool*) [18]

3.1 INTRODUCCIÓN A LOS SIMULADORES

Se define la simulación como una técnica que imita el comportamiento de un sistema del mundo real conforme evoluciona en el tiempo. Por lo tanto, se podrán analizar y observar diferentes características, sin la necesidad de acudir al sistema real. Surgen pues, de éste concepto, dos nuevas definiciones:

- **Modelo de simulación:** Se refiere al conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema expresado como relaciones matemáticas y/o lógicas entre los elementos del sistema.
- **Proceso de simulación:** Es la ejecución del modelo a través del tiempo en un computador para generar los resultados del comportamiento del sistema.

En resumen, se puede decir que el modelo hace referencia a la representación del sistema real que se va a analizar, las condiciones de su funcionamiento, y las variables que emplea. En cambio, el proceso hace referencia a una ejecución concreta, con unos valores asociados a las variables que se pueden ajustar en el modelo, y que se realiza para obtener los resultados referidos a ciertos parámetros que especifican el comportamiento del sistema.

La simulación se limita a informar de cuál sería el comportamiento del sistema analizado en las condiciones que se indiquen para un proceso determinado.

Otro punto a tener en cuenta son los resultados obtenidos por el simulador. El proceso se basa en el muestreo aleatorio, es decir, los resultados que de ella se extraigan, están sujetos a variaciones aleatorias y por este motivo los resultados obtenidos han de ser examinados. Por lo tanto, los resultados tendrán que ser evaluados y comprobar si son fiables o no conforme a las previsiones que se tenían antes de realizar dicho proceso.

Otra definición muy importante corresponde a la de *sistema*. Un sistema es un conjunto de elementos que, actúan e interactúan para lograr algún fin.

Cuando se habla de *estado del sistema* se hace referencia al conjunto de variables necesarias para describir el estado del sistema en un determinado instante de tiempo. Entre todas estas variables se tienen que distinguir las entradas y las salidas. Las salidas están expresadas mediante valores numéricos.

Las entradas serán los valores numéricos que permitan iniciar la simulación y obtener las salidas. En estas entradas, se incluyen:

- **Las condiciones iniciales:** Valores que expresan el estado del sistema al principio de la simulación.
- **Datos determinísticos:** Valores conocidos necesarios para realizar los cálculos que producen las salidas.
- **Datos probabilísticos:** Cantidades cuyos valores son inciertos pero necesarios para obtener las salidas del sistema. Los valores específicos de estos datos pueden generarse a través de una distribución de probabilidad.

3.2 TIPOS DE SIMULACIONES

Existen varias características que permiten clasificar las simulaciones. Aquí se muestran algunas de estas posibles clasificaciones:

- **Simulación estática:** Se denomina modelo de simulación estática a la representación de un sistema en un instante de tiempo determinado.
- **Simulación dinámica:** Se denomina modelo de simulación dinámica a la representación de un sistema cuando evoluciona con el tiempo.
- **Simulación determinista:** Se denomina modelo de simulación determinista a la representación de un sistema que no contiene absolutamente ninguna variable aleatoria.
- **Simulación aleatoria:** Se denomina modelo de simulación aleatoria a la representación de un sistema que contendrá variables aleatorias.
- **Simulación continua:** Se denomina modelo de simulación continuo a la representación de un sistema donde su comportamiento cambia de forma continua en el tiempo.
- **Simulación Discreta:** Se denomina modelo de simulación discreto a la representación de un sistema donde su comportamiento cambia únicamente en instantes de tiempo concretos, y como una respuesta a ciertos eventos.

En OPNET *Modeler* se manejan dos tipos de estadísticas, las cuales serán descritas a continuación:

- **Node Statistics:** Son estadísticas individuales que se pueden seleccionar en cada uno de los nodos de la red (computadores, encaminadores, cables de conexión, entre otros), de modo que se pueda visualizar el comportamiento de cada nodo.
- **Global Statistics:** Son estadísticas que se representan el comportamiento global de la red en un escenario de simulación. Permiten analizar su rendimiento general.

3.3 OPNET *MODELER*

3.3.1 Qué es OPNET *Modeler*

Es un lenguaje de simulación orientado a las comunicaciones. Proporciona acceso directo al código fuente siendo esto una gran ventaja para los nuevos programadores que se aventuren a programar con OPNET.

Actualmente es utilizado por grandes empresas de telecomunicaciones, por ejemplo para desarrollar proyectos gubernamentales y del ejército, etc.

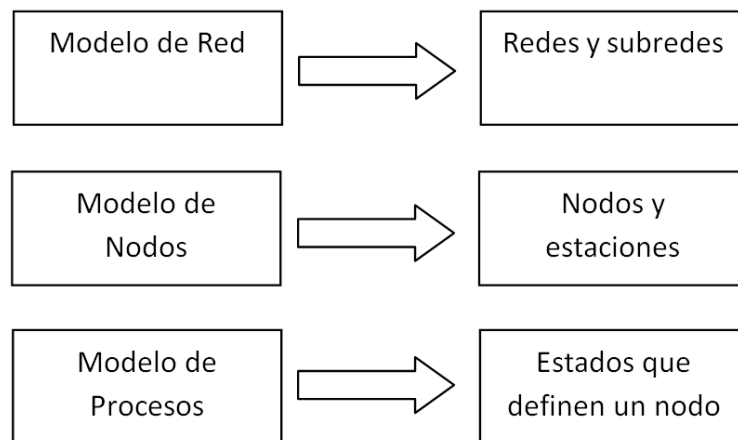
Para más detalle se dispone de su página oficial <http://www.opnet.com>, donde se puede encontrar toda la información referente a cómo descargar el software necesario, qué es OPNET, etc.

3.3.2 Cómo funciona OPNET *Modeler*

Como se verá a continuación, OPNET es un simulador que posee una interfaz muy seductora para los usuarios. Esto es debido a que incluye varias librerías de modelos. El código fuente de estas librerías es accesible si se dispone de la versión OPNET *Modeler* y esto consigue que el programador se pueda familiarizar más rápidamente con toda la jerarquía interna del programa.

Para ser utilizado, primero el usuario tiene que comprender la jerarquía que se utiliza para poder plantear las simulaciones. Esta jerarquía de diseño se muestra en la figura 4.

Figura 4. Jerarquía de diseño en OPNET *Modeler*

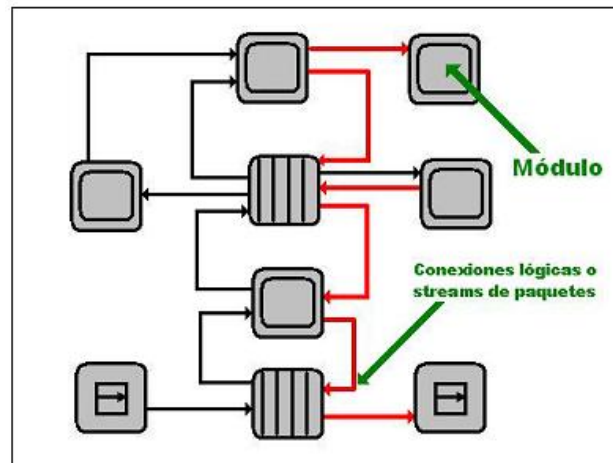


Fuente [18]

Como podemos observar en la figura anterior, se tiene un modelo de red donde irán definidas las redes y subredes de la simulación. Seguidamente se dispone de un modelo de nodos donde se define la estructura interna de éstos y por último se tiene el modelo de procesos donde se definen los estados que definen un nodo.

En la correcta simulación de un proyecto se debe haber entendido los aspectos anteriores; puesto que de lo contrario la simulación saldría errónea y no serviría. Como se ha mencionado con anterioridad, se posee un modelo de nodos. Este modelo de nodos funciona como se muestra la figura 5.

Figura 5. Funcionamiento del modelo de nodos.













Fuente [18]

Un nodo puede tener en su interior varios módulos. Éstos módulos tienen una función definida en su interior, así, un módulo llamado *receptor* tendrá la función de recibir los paquetes de otro. Para modificar los módulos de la simulación se necesita tener el *node editor*, que se puede encontrar en el *OPNET Modeler*.

Los módulos que ofrece el *node editor* son descritos en la tabla 6.

Tabla 6. Módulos del *Node Editor*




	Icono estándar para un módulo de procesado. Su función principal es construir bloques de modelo de nodo.
	Icono estándar usado para un módulo de cola. Lo que le hace diferente del resto de módulos es que el módulo de colas tiene recursos adicionales internos llamados sub-colas.
	Icono usado para un módulo de recibir. Receptor Punto a Punto.
	Icono usado para un módulo de transmitir. Transmisor Punto a Punto.
	Icono usado para un módulo de recibir. Receptor tipo bus.
	Icono usado para un módulo de transmitir. Transmisor tipo bus.
	Icono usado para un módulo de recibir. Receptor por radiofrecuencia.
	Icono usado para un módulo de transmitir. Transmisor de radiofrecuencia.
	Icono estándar usado para las comunicaciones vía satélite.
	Icono estándar para un módulo esys.

Fuente: [18]

Todos estos módulos se relacionan directamente con los procesos mediante la opción *Process Model* en su opción *edit attributes*. Para realizar lo anterior, se da doble clic encima de cualquier nodo del escenario de simulación para abrir el *Node Model*. Una vez en el *Node Model*, se da clic derecho encima del módulo a modificar y se selecciona *edit attributes*.

Por otra parte, las conexiones lógicas que ofrece el *node editor* son descritas en la tabla 7.

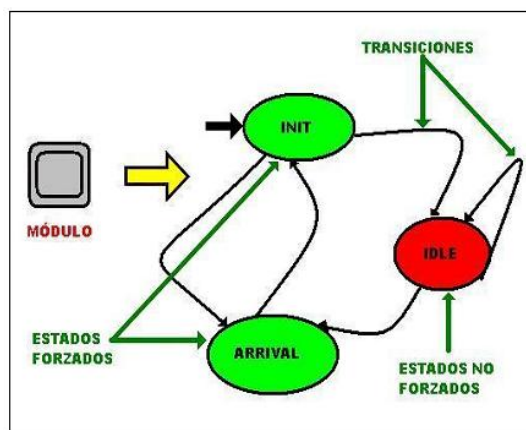
Tabla 7. Conexiones del *Node Editor*.

	<p><i>Packet Stream</i>: Son conexiones que llevan los paquetes desde un módulo fuente a un módulo destino.</p>
	<p><i>Statistic wires</i>: Transportan datos de un módulo fuente a un módulo destino. Sirven como interface para que un módulo fuente pueda compartir datos con un módulo destino, y proporcionar información respecto de su estado.</p>
	<p><i>Logical associations</i>: Su misión es indicar qué relación existe entre dos módulos de la simulación. Por tanto, no trasportan datos entre módulos.</p>

Fuente: [18]

Además se dispone de un modelo de procesos donde se define lo realizado en cada uno de los módulos de un nodo. La gráfica 6 muestra el funcionamiento explicado anteriormente.

Figura 6. Funcionamiento del módulo de nodos



Fuente [18]

La funcionalidad de cada módulo se define a través de modelos de proceso, que se representan mediante máquinas de estados finitos (*FSM*). Las transiciones entre estados pueden ser condicionales o incondicionales. El funcionamiento interno tanto de estados como de transiciones implica la programación de código C/C++.











Para crear estos modelos de procesos, el software ofrece un editor llamado *process editor*. En éste se pueden definir los estados y las transiciones de los estados. Además, en él se programa el grueso de la simulación en lenguaje C++. Una vez se ha creado el modelo de proceso, el siguiente paso es la compilación y la verificación. Para este paso se debe instalar en el computador un compilador de C++.

En la tabla 8 se dispone de los iconos de configuración del *process model*

En el momento de realizar una simulación, el programador tendrá que efectuar los siguientes pasos:

- Descripción del modelo
- Modelo de red
- Modelo de nodos
- Modelo de procesos
- Resultado de la simulación

Tabla 8. Opciones del *Process Model*

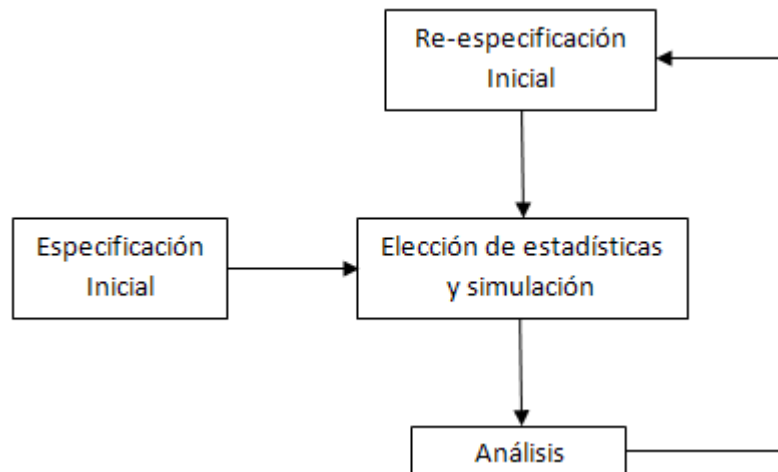
	<i>Create State</i> : Crea un estado dentro del <i>process model</i> .
	<i>Create Transition</i> : Crea transiciones entre los diferentes estados.
	<i>Set Initial State</i> : Establece el Estado Inicial.
	<i>Edit State Variables</i> : Establece los estados variables de la simulación.
	<i>Edit Temporary Variables</i> : Instaura Estados Temporales para el <i>process model</i> .
	<i>Edit Header Block</i> : Instaura el <i>Header Block</i> donde se declaran las variables, macros, tipos de datos, etc., incluidos en el <i>process model</i> .
	<i>Edit Function Block</i> : Instaura el <i>Function Block</i> en el cual se crean nuevas funciones en C++ para el <i>process model</i> .
	<i>Edit Diagnostic Block</i> : Establece el <i>Diagnostic Block</i> que contiene funciones sobre el estado de la simulación.
	<i>Edit Termination Block</i> : Establece el <i>Termination Block</i> donde se establecen unas funciones que son ejecutadas antes de terminar la simulación.
	<i>Compile Process Model</i> : Compilación del código.

Fuente: [18]

3.3.2.1 Fases para la Realización de una Simulación en OPNET Modeler

Para la realización de una simulación en OPNET Modeler se siguen 3 fases descritas en la figura 7.

Figura 7. Esquema de las fases de la simulación



Fuente [18]

Como se puede observar en la figura 7, la especificación del modelo consiste en desarrollar la representación del sistema a estudiar. Para esta fase, se dispone de modelos ya realizados en OPNET Modeler y de editores para construir modelos propios.

Una vez especificado el modelo a simular, el siguiente paso es elegir los datos a recolectar y seguidamente se dispone a realizar el análisis para validar las especificaciones expuestas en el modelo. En el caso de que estos resultados no fuesen los deseados, se tendría que hacer una re-especificación donde se modificarían los aspectos erróneos del modelo simulado.

3.3.3 Partes de OPNET Modeler

A continuación se explican las diferentes partes de que consta el OPNET *Modeler*. Los editores incluidos proporcionan las herramientas necesarias para la creación de topologías de red. Cada editor se encarga de una tarea distinta.

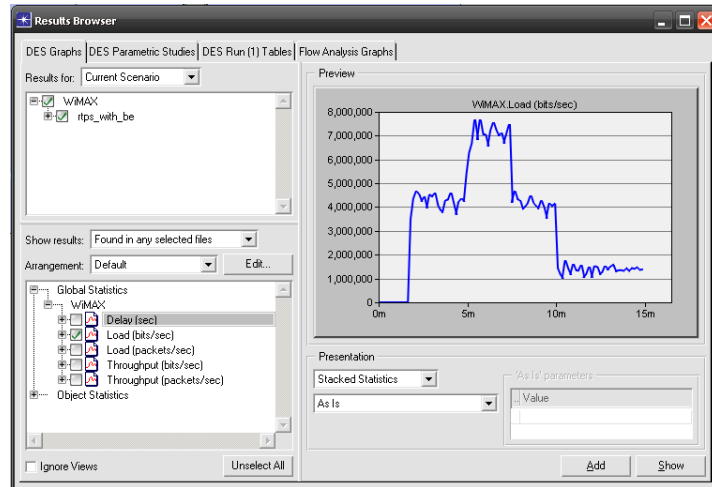
3.3.3.1 Project Editor:

El *Project editor* es el principal escenario en la creación del entorno de la simulación de la red. Es usado para crear un modelo de red utilizando otros ya existentes que se pueden encontrar en la librería estándar, recolectar estadísticas sobre la red, comenzar la simulación y observar los resultados. También se pueden crear nodos, construir formatos de paquetes, etc. Este editor contiene tres tipos básicos de objetos: subredes, nodos y enlaces.

Las paletas, accesibles mediante un icono situado en la parte superior izquierda del editor (ver figura 9), ordenan los objetos disponibles en categorías. Por ejemplo, en la paleta *ethernet*, se encuentran los nodos y enlaces más utilizados para el diseño de este tipo de red.

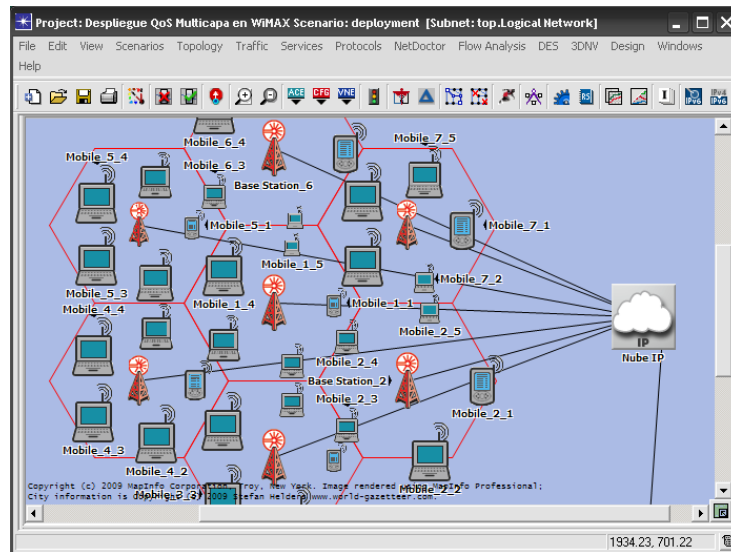
En este editor como se ha mencionado se pueden observar los resultados obtenidos. Al seleccionar la opción de ver resultados (*view results*), aparecen las estadísticas disponibles. Esta opción se logra visualizar como se observa en la figura 8, donde se plasma la visualización de un resultado de retardo. También se puede distinguir en la zona izquierda inferior de la figura una selección, ésta son los diferentes resultados que permite analizar el programa.

Figura 8. Visualización de resultados.



Fuente [18]

Figura 9. Formato *Project Editor*



Fuente [18]

A continuación se describirá la forma de modificar los diferentes componentes de una simulación en *OPNET Modeler*.

3.3.3.2 Node Editor

El *node editor* es un editor que es usado para crear modelos de nodos especificando su estructura interna. Estos modelos son usados para crear nodos en el interior de la red en el *Project Editor*.

Internamente, los modelos de nodos tienen una estructura modular, al ser definido un nodo como la conexión entre varios módulos con paquetes de *streams* y cables. Esta conexión permite intercambiar información y paquetes entre ellos. Cada módulo tiene una función específica dentro del nodo, tal como: generar paquetes, encolarlos, procesarlos o transmitirlos y recibirlos.

En este editor, los elementos se encuentran disponibles como cajas negras, albergando atributos que pueden ser configurados. Cada una de ellas representa una función en el nodo.

Los objetos presentes en este editor son los procesadores. El comportamiento de éstos viene definido en el editor de procesos. Existen modelos ya configurados, tales como fuentes de datos, sumideros, etc.

Los procesadores más comunes son:

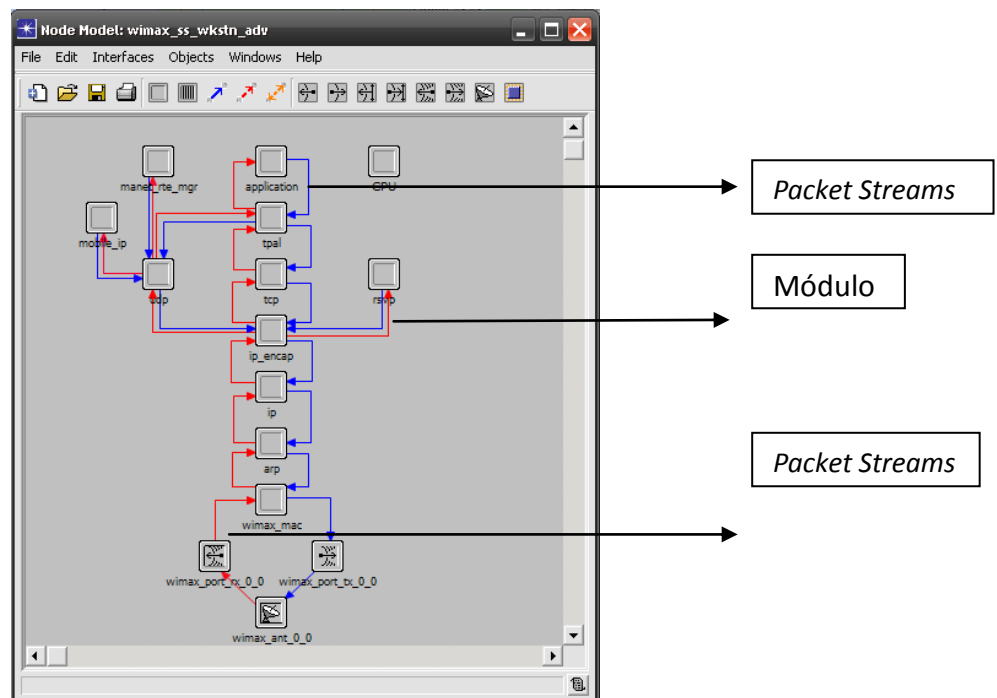
- **Colas:** Poseen distintos atributos para definir el carácter de la misma.
- **Transmisores y receptores:** Controlan la salida y entrada de paquetes al nodo.

- **Stream de paquetes:** Lleva el flujo de paquetes entre cajas negras.
- **Statistics Wire:** Transporta estadísticas.

-Cable de asociación lógica transmisor-receptor: Usado para crear un vínculo entre transmisores y receptores de un mismo elemento.

La estructura de formación de un modelo de nodo se puede visualizar en la siguiente figura, en ella se muestra tanto el editor de nodos como un pequeño ejemplo en él. En ese ejemplo se logra distinguir los diferentes procesadores que anteriormente se han expuesto.

Figura 10. Node Editor



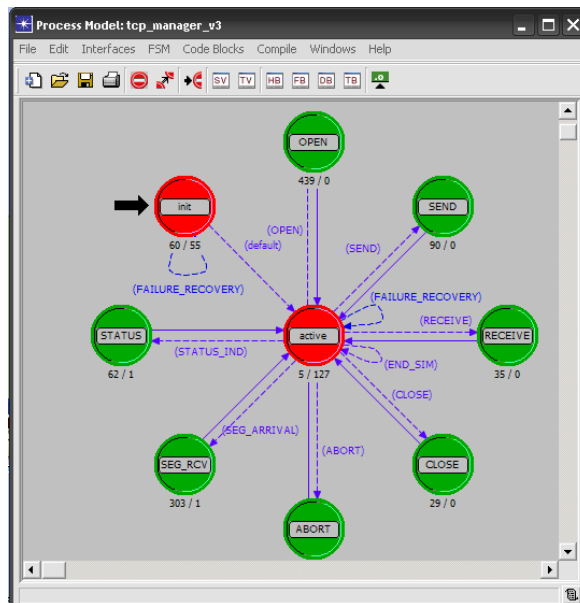
Fuente [18]

3.3.3.3 *Process Model Editor*:

Se utiliza en la creación de modelos de procesos, que a su vez controlan los modelos de nodo creados en el *Node Editor*. Los *Process Model* son representados por estados (*FSM*), y son creados por iconos que representan estos estados y por líneas que representan las transiciones entre ellos.

Las operaciones que realizan cada estado o cada transición se escriben en lenguaje *C++*. A este tipo de simulación se le denomina simulación *DES* (*Discrete event simulation*). La estructura de este editor se visualiza en la siguiente figura, mediante un ejemplo de un proceso.

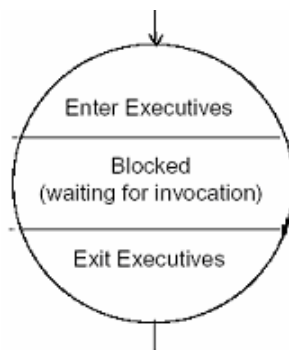
Figura 11. Formato del *Process Model Editor*.



Fuente [18]

En este editor se colocan los diferentes estados. Todos ellos están compuestos de dos partes: Una parte llamada *enter executives* donde se alberga la programación ejecutada a los procesos incidentes al estado, y otra parte denominada *exit executives* en la que como su nombre indica se ejecutan sus comandos cuando el proceso sale del estado hacia una transición.

Figura 12 .*Enter executives/ Exit executives*



Fuente [18]

Existen dos tipos de estados

1.- Estado forzado



Un estado forzado es aquel que cuando le llega un proceso, ejecuta los comandos que tiene su *enter executives* e inmediatamente ejecuta los comandos que tiene su *exit executives*. A continuación el proceso saldrá por una transición.

2.- Estado no forzado.



Un estado no forzado permite hacer una pausa entre el *enter executive* y el *exit executives*. Cuando un proceso llega a este estado, en primer lugar se ejecuta el *enter executives* y se forma una pausa hasta que sucede una nueva invocación. Cuando esta invocación se ha producido, se ejecuta el *exit executives* y el proceso pasa a la transición de salida.

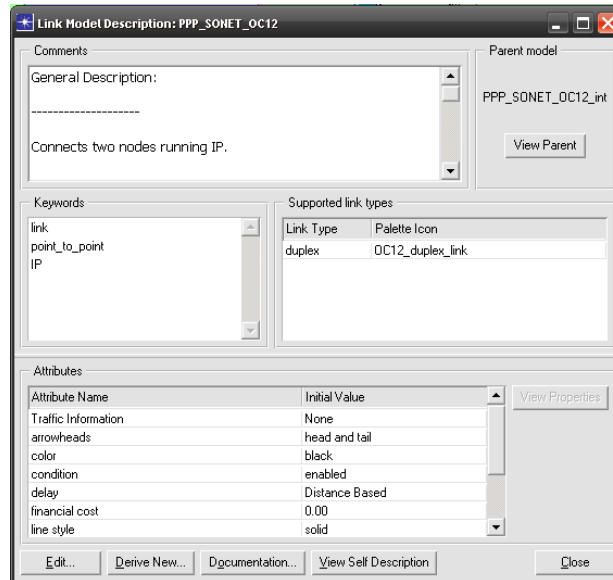
Por lo tanto se puede decir que los objetos más importantes de este editor son:

- **Estados:** Cada uno de ellos representa un proceso. Se definen en él las funciones a realizar durante su ejecución.
- **Transiciones:** Marcan la condición que se necesita para pasar de un estado a otro.
- **Bloques:** Sirven para la programación, la declaración de variables, funciones, etc.

3.3.3.4 *Link Model Editor*

Este editor ofrece la posibilidad de crear nuevos tipos de objetos *link*. Cada nuevo tipo de *link* puede tener diferentes atributos y representaciones. En la siguiente figura se muestra el editor.

Figura 13. *Link Model Editor*



Fuente [18]

Un *link model* especifica la información siguiente:

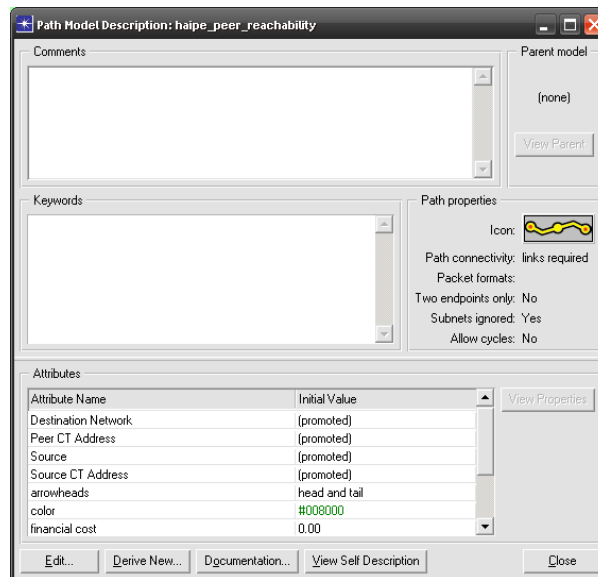
- **Tipo de enlace soportado:** Todos los enlaces que soporta el simulador. Estos enlaces son los siguientes: punto a punto *duplex*, punto a punto simple, bus y *taps links*.
- **Keyword:** Sirve para simplificar la paleta del project editor y así facilitar el trabajo al programador.
- **Comentarios:** Este apartado permite añadir comentarios a los enlaces. Es muy útil a la hora de utilizar la versión de evaluación ya que no se puede acceder al editor y poder ver lo que hace. Aquí se pueden comentar la capacidad del enlace, las características, etc.

- **Especificación de atributos:** Aquí se pueden cambiar los valores de los atributos puestos por defecto.

3.3.3.5 Path Editor

Es usado para crear nuevos objetos *path* que sirven para definir un *traffic route*. En la siguiente figura se muestra este editor.

Figura 14. Path Editor



Fuente [18]

Se debe tener en cuenta que ningún protocolo que use conexiones lógicas o circuitos virtuales puede usar *paths* para *routes* de tráfico.

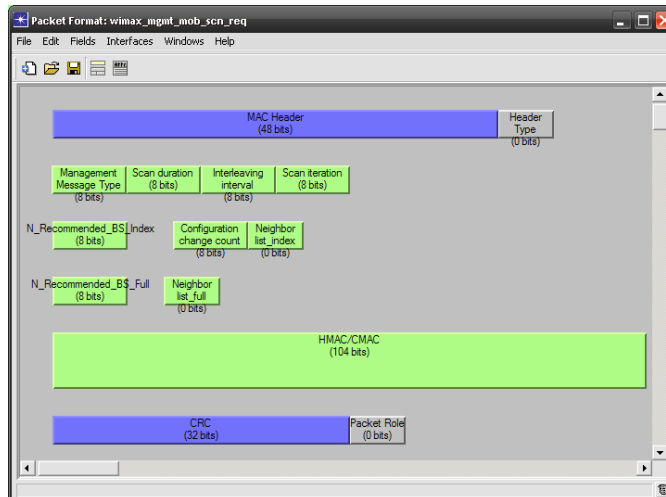
3.3.3.6 Packet Format Editor

Este editor es utilizado en la definición de la estructura interna de un paquete como un conjunto de campos. Para cada uno de los campos el *packet format* especifica un único nombre, tipo de datos, valor por defecto, tamaño en *bits*, comentarios opcionales, etc.

Los *packet formats* son atributos de los módulos de transmisión y recepción del modelo de nodos. El formato de un paquete contiene uno o más campos, representados en el editor como cajas rectangulares.

El tamaño de la caja es proporcional al número de *bits* específicos del campo. En la figura siguiente se puede observar tanto el editor como un ejemplo de un paquete.

Figura 15. *Packet Format Editor*

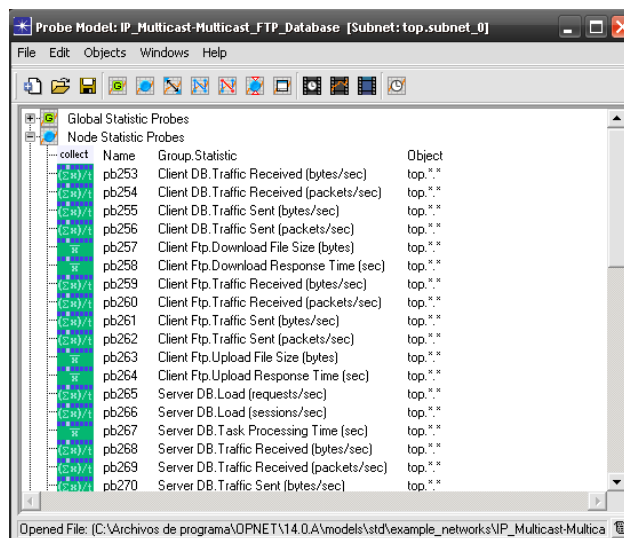


Fuente [18]

3.3.3.7 Probe Editor

Probe editor es usado para especificar las estadísticas que van a ser recopiladas. Pueden ser de diferentes tipos como: estadísticas globales, de enlaces, de nodos, de atributos, etc. Este editor tiene una representación que podemos contemplar en la figura siguiente.

Figura 16. *Probe Editor*

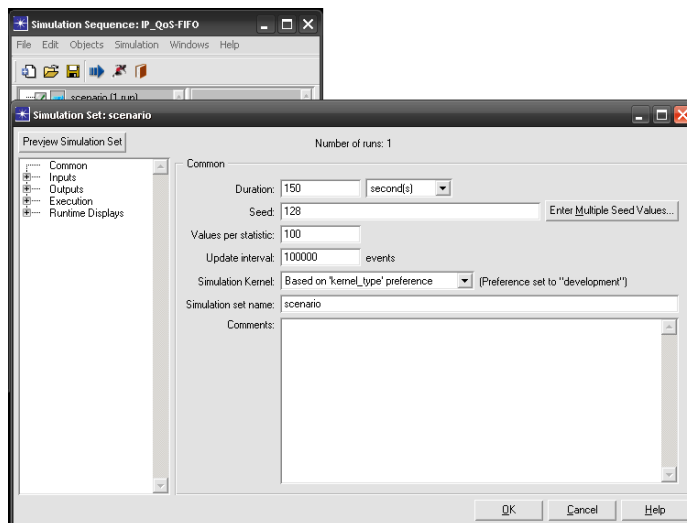


Fuente [18]

3.3.3.8 Simulation Sequence Editor

En este editor se pueden añadir valores adicionales específicos tales como el control del tiempo de simulación, la velocidad, etc. En la siguiente figura se puede observar.

Figura 17. *Simulation Sequence Editor*

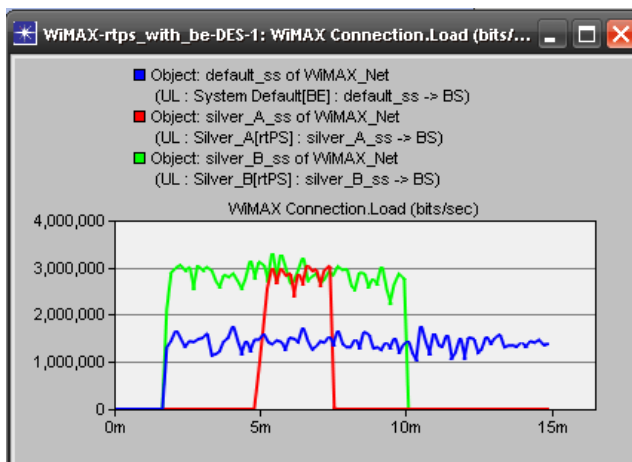


Fuente [18]

3.3.3.9 *Analysis Tool*

El *analysis tool* se emplea para crear gráficos escalares de parámetros a estudiar, definir estadísticas de datos, y contemplar los resultados de la simulación. En la siguiente figura se puede detallar este editor.

Figura 18. *Analysis Tool*



Fuente [18]

3.3.4 Simulación *DES*

Se ha comentado anteriormente que el entorno de simulación OPNET utiliza la tecnología *DES* (*Discrete event simulation*). Ahora se dispondrá a exponer de qué trata esta tecnología.

En una simulación *DES* se utilizan eventos para describir sucesos o acciones que tienen lugar en un determinado momento. Cada uno de estos eventos tiene un instante de incidencia puntual en la escala temporal. Esta escala, al igual que el resto de magnitudes, es discreta.

Durante la simulación, se puede distinguir entre el tiempo real y el tiempo de simulación, por ello se utilizan variables contador para representar el momento actual y las cantidades de tiempo. También se utilizan varias variables de estado para representar la fase del sistema simulado. Por lo que se refiere al sistema, evoluciona en la memoria del computador, produciéndose diferentes eventos que edifican las variables de estado, y éstas a su vez determinan los futuros eventos.

Cada evento tiene un instante de incidencia puntual, es decir, pueden ser representados sobre la escala temporal discreta de la simulación ocupando una única posición. De este modo, dichos eventos logran ser ordenados cronológicamente, según su instante de incidencia, para ser procesados. En este tipo de simulación, el evento es la unidad de ejecución. Cada uno describe una acción, y el resultado de ésta es la modificación de las variables de estado. Esta característica está especialmente soportada por los lenguajes *OOP* (programación orientada a objetos).

Así pues, un simulador *DES* debe tener un bloque que inicialice todas las variables de estado del sistema simulado, un procesador que ejecute eventos, un planificador (*scheduler*) que sincronice los bloques asegurando que los eventos se

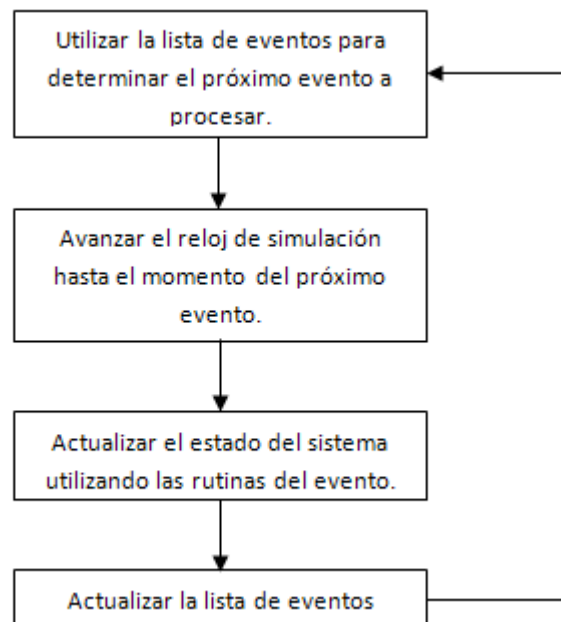
ejecutan en el orden adecuado y un recolector de datos estadísticos que tome nota de lo ocurrido. Por último, al finalizar la simulación o de manera dinámica durante su ejecución, se podrán procesar los datos recogidos para extraer la información deseada con la posibilidad de representarlos de forma gráfica.

Entretanto, la simulación se repite de forma continuada en un diagrama de bloques que en cada iteración recoge el primer evento a procesar. A continuación se ejecuta éste y modifican sus variables de estado, después avanza el contador de tiempo hasta el momento de incidencia del próximo evento, y se reinicia el bucle.

Como se ha mencionado anteriormente, el contador de tiempo no avanza de manera constante, sino que salta directamente el tiempo restante desde el primer instante actual hasta la incidencia del próximo evento, siendo este periodo aleatorio y determinado por la secuencia de eventos.

Durante la actualización del contador de tiempo y la modificación de las variables de estado, pueden generarse nuevos eventos que se insertarán en la lista de eventos a procesar o modificarán los atributos de los ya existentes. El proceso mencionado se detalla en la figura 19.

Figura 19. Proceso Simulación *DES*



Fuente [18]

4 WiMAX [19]

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es un estándar de transmisión inalámbrica de datos (802.16x) que está diseñado para ser utilizado en redes de área metropolitana (*MAN*). En condiciones óptimas, *WiMAX* presenta un gran alcance, que puede llegar hasta 60 kilómetros de radio, además de poseer un gran ancho de banda el cual permite velocidades de hasta 70 *Mbps*.

WiMAX está basado en la norma *IEEE 802.16* [20]. Esta norma fue diseñada específicamente como una solución de última milla, y enfocada en los requerimientos para prestar servicio a nivel comercial.

La tecnología *WiMAX* ha sido optimizada para proveer cobertura sin línea de visión (*Non line of Sight – NLOS*) utilizando las técnicas que se listan a continuación:

- Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (*OFDM*).
- Sub-Canalización.
- Antenas direccionales.
- Diversidad de transmisión y recepción.
- Modulación adaptativa.
- Técnicas de corrección de error.
- Control de potencia.

4.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

A continuación se listan las características principales que posee el estándar *WiMAX*: [21]

- Anchos de canal entre 1,5 y 25 MHz.
- Utiliza técnicas de acceso múltiple y OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) con 256 y 2048 portadoras respectivamente, que permiten altas velocidades de transferencia incluso en condiciones poco favorables.
- Incorpora soporte para tecnologías “*smart antennas*” que mejoran la eficiencia y la cobertura. Estas antenas son utilizadas en las redes celulares de 3G, haciendo más eficiente el uso del espectro, llegando así a conseguir el doble que el estándar *IEEE 802.11*.
- Incluye mecanismos de modulación adaptativa, mediante los cuales la estación base y el equipo de usuario se conectan utilizando la mejor de las modulaciones posibles, en función de las características del enlace radio. *WiMAX* usa modulaciones 64QAM, 16QAM y QPSK [4].
- Soporta varios cientos de usuarios por canal, con un gran ancho de banda y es adecuada tanto para tráfico continuo como a ráfagas, siendo independiente de protocolo; así, transporta *IP*, *Ethernet*, *ATM* etc. y soporta múltiples servicios simultáneamente ofreciendo Calidad de Servicio (QoS) en 802.16e, por lo cual resulta adecuado para voz sobre *IP* (*VoIP*), datos y vídeo.

- También, se contempla la posibilidad de formar redes multi salto (*multi hop networks*). para que los distintos usuarios se puedan comunicar entres sí, sin necesidad de tener visión directa entre ellos.
- En cuanto a seguridad, tiene medidas de autenticación de usuarios y permite el cifrado de datos mediante los algoritmos triple *DES (Data Encryption Standard)* y *RSA (Rivest, Shamir, and Adleman, Public Key System)*

4.2 COMPONENTES DE UNA RED *WiMAX* [22]

Un sistema de *WiMAX* tiene dos partes:

- Por un lado están las torres *WiMAX*, que dan cobertura grandes extensiones topográficas según el tipo de señal transmitida. Denominadas como Estación Base ó *Base Station (BS)*.
- Por otro están los receptores, es decir, las tarjetas que conectamos a nuestro *PC*, portátil, *PDA* y demás para tener acceso a la red. Conocidas como *SS (Subscriber Station)* en entornos estáticos ó *MS (Mobile Station)* en entornos móviles.

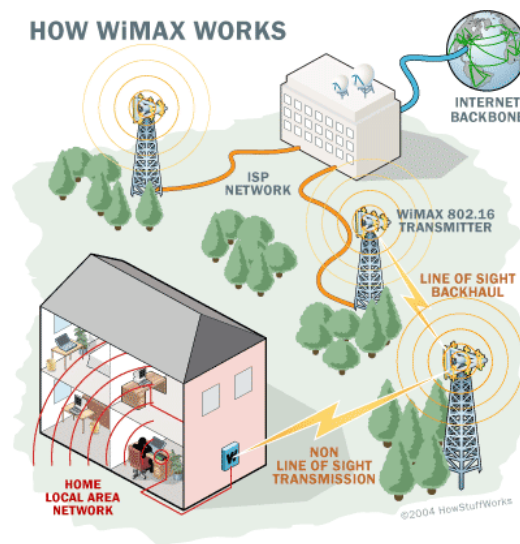
Además en el estándar *WiMAX* existen dos tipos de formas de ofrecer señal:

- **Operación sin línea de vista:** Cuando hay objetos que se interpongan entre la antena y el receptor. En este caso se opera con bajas frecuencias (entre los 2 y los 11 *GHz*) para así no sufrir interferencias por la presencia de objetos. Naturalmente esto hace que el ancho de banda disponible sea

menor. Las antenas que ofrezcan este servicio tendrán una cobertura de hasta 65 Km. cuadrados (más o menos como las de los teléfonos móviles).

- **Operación con línea de vista:** Cuando no hay nada que se interponga y hay contacto visual directo. En este caso se opera a muy altas frecuencias, del orden de hasta 66 GHz, disponiendo de un gran ancho de banda.

Figura 20. Componentes de una red WiMAX



Fuente: [22]

4.3 VARIANTES ESTÁNDARES WiMAX [23]

Actualmente dentro del estándar IEEE 802.16x, existen dos variantes:

- **Uno de acceso fijo**, (802.16d), en el que se establece un enlace radio entre la estación base y un equipo de usuario situado en el domicilio del usuario. Para el entorno fijo, las velocidades teóricas máximas que se pueden obtener son de 70 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz. Sin

embargo, en entornos reales se han conseguido velocidades de 20 *Mbps* con radios de célula de hasta 6 Km, ancho de banda que es compartido por todos los usuarios de la célula.

- **Otro de movilidad completa** (802.16e), que permite el desplazamiento del usuario de un modo similar al que se puede dar en *GSM*(*Global System for Mobile communications*) y *UMTS*(*Universal Mobile Telecommunications System*) .Esta variante actualmente compite con las tecnologías *LTE* (*Long Term Evolution*), por ser la alternativa para las operadoras de telecomunicaciones que apuestan por los servicios en movilidad. Este estándar, en su variante "no licenciado", compite con el *WiFi IEEE 802.11n*, ya que la mayoría de los portátiles y dispositivos móviles, empiezan a estar dotados de este tipo de conectividad (principalmente de la firma *Intel*). [23]

4.4 SOPORTE DE CALIDAD DE SERVICIO EN *WiMAX* [24]

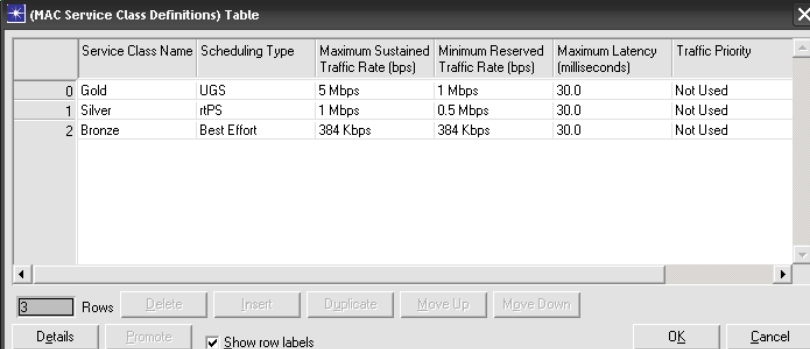
El soporte de calidad de servicio es un aspecto fundamental en el estándar *IEEE 802.16*. La sólida política de control para soporte de en QoS en *WiMAX* se logra, implementando una arquitectura orientada a conexión, donde las conexiones *uplink* y *downlink* son controladas por la estación base. Antes de que se inicie algún tipo de transmisión, la estación base y la estación suscriptora establecen un enlace lógico unidireccional, el cual es identificado con un numero llamado *Connection Identifier (CID)* de 16 *bits*. En el estándar *IEEE 802.16* se maneja el concepto de *Service Flow* (flujo de servicio). Un *Service Flow* permite la transmisión unidireccional de tráfico bajo ciertos parámetros de calidad de servicio. Los *Service Flows* pueden ser mapeados a *DiffServ Code Points (DSCP's)* para habilitar una red *IP extremo-extremo* basada en QoS.

El estándar *WiMAX* apoya en forma nativa la calidad de servicio (QoS), es decir, la capacidad de garantizar que un servicio funcione con unos requisitos mínimos cuando se lo utiliza. En la práctica, *WiMAX* permite que el ancho de banda se reserve para un propósito determinado. Algunas aplicaciones no pueden funcionar cuando se produce un cuello de botella. Éste es el caso de Voz sobre *IP* (*VoIP*) ya que la comunicación por voz es ineficaz si se introducen vacíos de segundos [26].

4.4.1 Configuración *WiMAX*

Las clases de servicio (*Service Classes*) de *WiMAX* tienen como función administrar los requerimientos de calidad de servicio de cada flujo de servicio, donde cada flujo de servicio tiene una la dirección del tráfico entre la estación base y las estaciones suscriptoras. Los flujos de servicio desde la estación base a la estación suscriptora son llamados *downlink flows* mientras que los flujos de servicio desde la estación suscriptora hacia la estación base son denominados *uplink flows*. Para cualquier clase de servicio existen unos parámetros clave básicos que son: una tasa sostenible de tráfico y un tipo de planificador (*Scheduler Type*) los cuales permiten que la red *WiMAX* posea capacidades de calidad de servicio para soportar tráfico sensible a retardos como voz y video. Hay cuatro *Scheduler Types* a seguir: *UGS* (*Ungranted Service*), *rtPS* (*real time polling service*), *nrtPS* (*non real time polling service*) y *BE* (*Best Effort*). Los recursos de ancho de banda son asignados a primero a *UGS*, luego a los flujos *rtPS* y *nrtPS*. De último se asigna el ancho de banda remanente a los flujos *Best Effort* [27].

Figura 21. *MAC Service Class Definitions*



	Service Class Name	Scheduling Type	Maximum Sustained Traffic Rate (bps)	Minimum Reserved Traffic Rate (bps)	Maximum Latency (milliseconds)	Traffic Priority
0	Gold	UGS	5 Mbps	1 Mbps	30.0	Not Used
1	Silver	rtPS	1 Mbps	0.5 Mbps	30.0	Not Used
2	Bronze	Best Effort	384 Kbps	384 Kbps	30.0	Not Used

Fuente: OPNET *Modeler* 14.0/14.5

Como se ha mencionado, *WiMAX* soporta los siguientes tipos de QoS denominados *Scheduling Types*:

- ***Unsolicited Grant Service (UGS)***: está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real que generen un tráfico de tasa de transferencia constante en tiempos periódicos, tales como Voz sobre *IP (VoIP)* sin supresión de silencio y conexiones *T1/E1*.
- ***Real-time polling service (rtPS)***: está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real que generen tráfico a velocidad variable tales como video (*MPEG*) y *VoIP* con supresión de silencio.
- ***Nonreal-time polling service (nrtPS)***: está diseñado para soportar aplicaciones que no sean de tiempo real y que manejen tasas de transferencia variables, tales como *File Transfer Protocol (FTP)*.
- ***Best-Effort (BE)***: provee un servicio justo y suficiente para aquellas aplicaciones que requieran un tráfico *BE* tales como tráfico *HTTP*. *BE* sirve

los paquetes basándose en el principio *FIFO (First In-First Out)* y usando el ancho de banda remanente dejado por los otros *Scheduling Types*.

El estándar *IEEE 802.16 MAC* es orientado a conexión, y todo el tráfico es relacionado con un flujo de datos, identificado con un *Connection Identifier (CID)*, el cual es asignado a uno de los cuatro *Scheduling Types* mencionados anteriormente. El tráfico *UGS* posee la prioridad más alta mientras que el tráfico *BE* posee la menor para un perfil de QoS. [8]

4.4.2 Topologías Implementadas en WiMAX

El concepto de última milla es generalmente referido a la conexión existente entre el proveedor de servicios y el usuario final. El usuario final puede ser una residencia o una empresa. El radio de cobertura de las estaciones base, puede ser incrementado implementando antenas omnidireccionales o direccionales. [28]

Una red *WiMAX* implementa usualmente una antena fija en cada estación suscriptor, localizada en el techo. Una estación suscriptor típica usa una antena direccional o sectorizada mientras un nodo móvil usa una antena omnidireccional. La estación base controla la actividad dentro de la celda, incluyendo acceso al medio por las estaciones suscriptoras, asignación de recursos para soportar calidad de servicio, y la admisión por parte de la red con base en mecanismos de autenticación. [28]

La red *WiMAX* consiste básicamente de una estación base (*BS*) y de una estación suscriptor (*SS*). Las estaciones suscriptoras son comúnmente *Access points* que agregan tráfico a la red proveniente de los usuarios finales. El estándar *IEEE 802.16* soporta dos modos de operación, el modo *PMP (Point to Multipoint)* y multi salto (*multi hop*). [26]

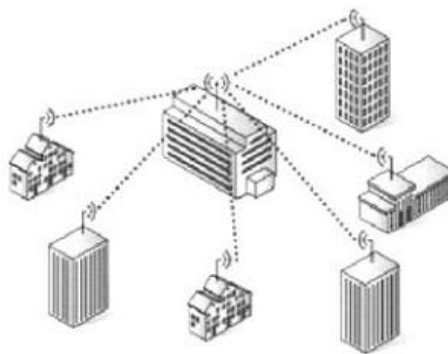
4.4.2.1 Topología Punto Multi Punto (PMP)

En el modo *PMP*, cada *SS* se comunica directamente con la *BS* a través de un enlace lógico, que requiere que la estación suscriptora posea cierta línea de vista (*LOS*) con la estación base. [26]

- **Características Topología Punto Multi Punto**

- Es más fácil de desplegar.
- Es más económica de implementar.
- Es el modo de operación más usado en *WiMAX*.
- Es más fácil de administrar y detectar fallos.
- Limita un crecimiento escalable.
- Cada nodo *SS* tiene un enlace único con la estación base, no existen rutas alternas.
- La arquitectura de los nodos de la red (estación base y nodos suscriptores) es más simple.

Figura 22. Topología Punto Multi Punto.



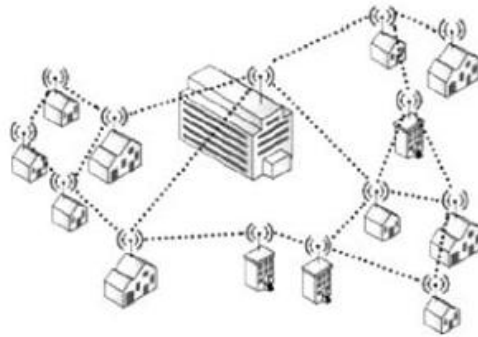
Fuente: [26]

4.4.2.2 Topología Multi Salto (MH)

En el modo multi salto, los nodos *SS* se comunican con la *BS* y con cualquier otro nodo a través de rutas alternas. La topología multi salto no solo permite extender la cobertura de la red a la vez que reduce los costos en ambientes que carecen de línea de vista, sino que también permite una configuración más rápida y flexible de la red. Además, la existencia de múltiples rutas provee una mayor confiabilidad y disponibilidad de recursos de la red. Con protocolos de enrutamiento inteligentes, el tráfico puede ser direccionado por enlaces que estén libres de congestión [26]

- **Características Topología Multi Salto**
 - Es más difícil de administrar y detectar fallos
 - Es más costosa de implementar, lo que no la hace atractiva para los proveedores de servicios *WiMAX* en la actualidad.
 - Al permitir que todos los nodos de la red estén interconectados, genera un alto grado de confiabilidad en los servicios de la red.
 - La arquitectura de los nodos de la red (estación base y nodos suscriptores) es más compleja.
 - No requiere línea de vista entre los nodos suscriptores con la estación base.
 - Permite un crecimiento escalable.

Figura 23. Topología Multi Salto



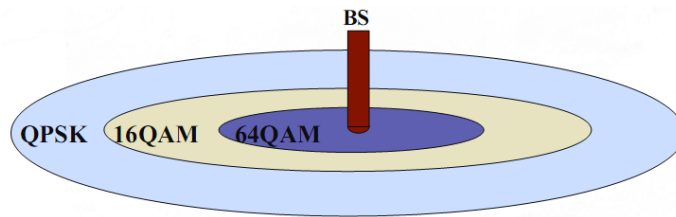
Fuente [26]

4.4.3 Modulaciones y Codificaciones Implementadas en *WiMAX*

WiMAX soporta varios tipos de modulaciones y codificaciones que varían de acuerdo a las condiciones del canal de transmisión, ver figura 24 y tabla 9. Para esto, *WiMAX* posee un canal que verifica constantemente las condiciones del canal entre el nodo *SS* y la estación base para el enlace *Downlink*. Para el enlace *Uplink*, la estación base puede estimar la calidad del canal, basado en la potencia de la señal recibida. El planificador de la estación base toma en cuenta la calidad del canal sea *Uplink* ó *Downlink* en cada nodo *SS*, y asigna un esquema de codificación y modulación basado en la relación señal a ruido, que maximiza el rendimiento de la transmisión. Una modulación adaptativa, incrementa de manera significativamente el rendimiento y la capacidad general del sistema, ya que permite una compensación en tiempo real entre el rendimiento y la confiabilidad en cada enlace. [24]

Los parámetros de calidad de servicio varían dependiendo de la distancia entre el nodo *SS* y *BS*. Se debe tener en cuenta que la distancia entre estos nodos es la mayor responsable de la *CINR*¹ (*Carrier to Interference Noise Ratio*) [29]

Figura 24. Modulaciones usadas en *WiMAX* de acuerdo a la calidad de la señal.



Fuente: [28]

Tabla 9. Codificaciones y modulaciones usadas en *WiMAX*

Modulación	Codificación	Información <i>bits/símbolo</i>	Relación <i>S/N</i> (dB)
<i>QPSK</i>	1/2	1	9.4
	3/4	1.5	11.2
16-QAM	1/2	2	16.4
	3/4	3	18.2
64-QAM	2/3	4	22.7
	3/4	4.5	24.4

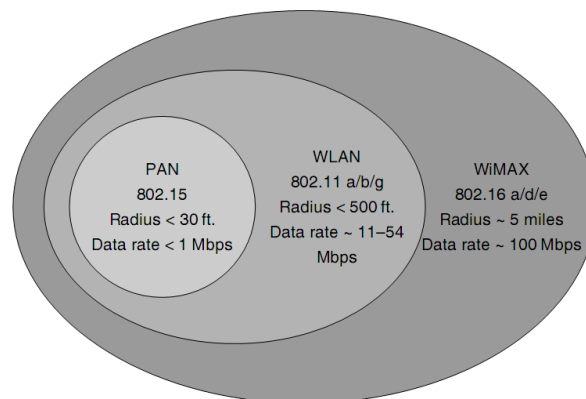
Fuente: [27]

¹ *CINR*: Es la medida de efectividad de una señal, expresada en decibeles (dB).

4.4.4 Capacidad de Servicio

WiMAX usa múltiples canales para una sola transmisión y puede ofrecer conexiones de hasta 350 *Mbps* (en condiciones ideales). El uso de la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (*OFDM*) además de incrementar el ancho de banda y la capacidad para la transmisión de datos mediante el uso de un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, se implementó por encima de estándares como Acceso Multiple por División de Código, debido a su rendimiento superior en condiciones donde no es posible una conexión mediante línea de vista (*LOS*). Una estación base típica en *WiMAX* provee ancho de banda suficiente para dar abasto con el tráfico de hasta 50 conexiones *T1* (1.544 *Mbps*) ó a cientos de estaciones suscriptoras proveyendo un acceso rápido a *Internet* por ejemplo. Comparado con sistemas *IEEE 802.11*, *WiMAX* posee un potencial más alto, ofreciendo más alcance y un mayor ancho de banda. [26]

Figura 25. Estándar *IEEE 802.16* comparado con otros estándares *IEEE 802*



Fuente:[21]

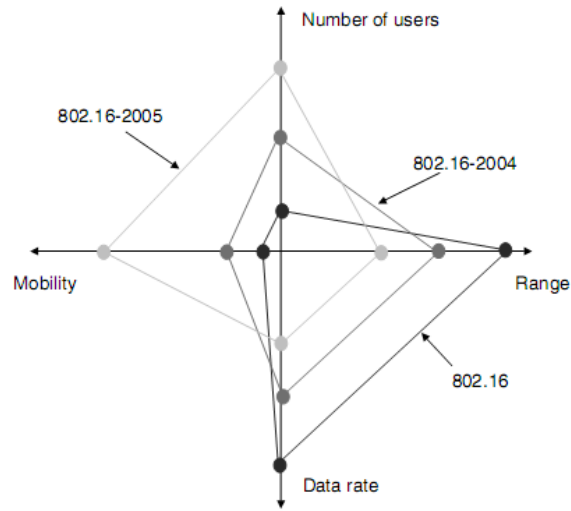
4.4.5 Movilidad

Para el usuario final, la movilidad es uno de los valores distintivos que las redes inalámbricas ofrecen. El hecho de que el nodo *MS* se mueva por aéreas extensas, representa una serie de desafíos para la interconectividad. Dos de estos desafíos son: proveer los medios para dar cobertura a todos los nodos móviles, para el envío de tráfico, sin importar el lugar donde se encuentren en la red, y el segundo desafío es el de mantener la conexión activa sin interrupciones sin importar el tipo de movilidad (sea en vehículo o caminando). [21]

En *WiMAX*, el dispositivo móvil puede mantener una sesión para la transferencia de datos en la red operativa para aplicaciones de tiempo real a medida que se desplaza a velocidades vehiculares en el área de cobertura de la red. *WiMAX* soporta esquemas de *handoff* con latencias bajas para asegurar el rendimiento de las aplicaciones como voz y video. [21]

En general, la evolución tecnológica de *WiMAX* ha apuntado hacia mejorar su capacidad y alcance para soportar una movilidad y escalabilidad superior. En la figura 26 se observa las capacidades básicas de las variantes del estándar *IEEE 802.16*.

Figura 26. Evolución de los estándares *WiMAX*



Fuente [21]

4.4.5.1 *Handover Homogéneo*

Handover ó *handoff* consiste en transferir una comunicación en progreso desde una celda a otra sin interrupciones. Más específicamente, el *handoff* se lleva a cabo cuando un nodo móvil se mueve por fuera del área de cobertura de una estación base ó cuando éste nodo detecta que una estación base diferente a la actual puede ofrecer una mejor calidad en la señal. Un nodo *MS* experimenta un *Handover Homogéneo* cuando se mueve dentro de redes que presentan la misma tecnología de acceso al medio. Las operaciones básicas de un proceso de *handoff* consisten en recolectar primero información de la red que se está usando, para luego seleccionar la estación base objetivo; solo entonces se ejecuta la transferencia de la comunicación. [30]

4.4.5.2 Handover en una Red IEEE 802.16

Los mecanismos de *handoff* pueden ser implementados tanto en el nodo *MS* como en el nodo *BS*. Para iniciar el proceso de *handoff*, el nodo *MS* necesita primero recolectar información relacionada con la red usando un método de difusión (*broadcast*) a través de las estaciones base o escaneándolas para identificar el nivel de la señal y la calidad del canal de transmisión en cada una de ellas con respecto al nodo móvil. La información recolectada es guardada en la red por un periodo de tiempo; la cual servirá para guiar al nodo *MS* a través del proceso de *handoff* cuando este sea requerido. Para que un proceso de *handoff* ocurra, se requiere que sean ejecutadas seis fases: [30]

- **Selección de celda:** Aquí, el nodo *MS* recolecta información relacionada con la red.
- **Inicio y decisión del *handoff*:** La decisión para realizar el proceso de *handoff* puede ser asumida por el nodo *MS* ó *BS* en una red *WiMAX*. La petición es enviada al nodo que inició el proceso, para luego iniciar el intercambio de mensajes que permitan ejecutar el *handoff* en la red.
- **Sincronización con el canal *downlink* de la estación base objetivo:** Para asociarse con la estación base destino, el nodo *MS* necesita sincronizarse con esta. Luego de que esto se lleve a cabo, se procede a iniciar el proceso de alcance y cobertura entre los nodos.
- **El alcance:** Esta fase es ejecutada después de la sincronización. Esta permite que el nodo *MS* adquiera los parámetros de transmisión correctos en el canal de transmisión en la red *WiMAX* como por ejemplo, nivel de potencia de la *BS*.

- **La finalización del servicio:** Esta fase indica el fin del proceso de *handoff*, la estación base destino finaliza todas las conexiones establecidas con el nodo *MS* y elimina toda la información relacionada con este.
- **La cancelación del *handoff*:** El proceso de *handoff* puede ser cancelado por el nodo *MS* sin importar si este proceso ya ha empezado; sin embargo, esta cancelación debe ser ejecutada antes de un determinado umbral de tiempo.

4.4.5.3 Handoff Forzado

En una red *WiMAX* también puede realizar un proceso de *Handoff* forzado. Aquí las estaciones base administran el número de nodos móviles (*MS*) ó nodos suscriptores (*SS*) existentes en cada celda dependiendo de la capacidad actual disponible en cada una de estas, con el propósito de balancear el ancho de banda disponible de cada estación base. Con el *Handoff* forzado, una red *WiMAX* puede proveer una continuidad al tráfico generado por las aplicaciones de red de cada nodo *MS* ó *SS* evitando situaciones de saturación de tráfico en cada celda. Este concepto es tratado en el escenario de simulación Movilidad con *Handoff* Forzado.

4.4.5.4 Access Service Network (ASN)

Access Service Network es un concepto que se maneja en las redes *WiMAX*, para proveer movilidad total, transparente al proceso de *handoff*, calidad de servicio, seguridad y administración de recursos en la red y en los nodos *SS* y *BS*.

Este modo de movilidad permite una administración más eficiente de sus recursos, además de adicionar opciones de seguridad a la hora de autenticar los nodos tipo *SS* o *MS*, y realiza más de manera más ágil los procesos de *handoff*, ya que ahora estos son gestionados por el nodo *ASN Gateway*.

En *OPNET Modeler* la movilidad *ASN (Access Service Network) Anchored Mobility* se utiliza mediante “*GRE Tunnels*”² (líneas verdes en el escenario) para direccionar el tráfico desde las estaciones base hacia el nodo *ASN*. “*GRE Tunnels*” (*GRE: Generic Routing Encapsulation*) es una técnica de encapsulamiento de paquetes de tráfico de datos en una red *IP*. Las siguientes son algunas de las características de *ASN Anchored Mobility* están soportadas en el presente *software* de simulación:

- Transferencia de “*service flows*” desde las estaciones móviles.
- Transferencia de información de control entre *ASN* y nodos de la red *WiMAX*.

Se puede observar en la figura anterior, que cada estación base está relacionada con el nodo *ASN*, mediante un “*GRE Tunnel*”.

El *ASN Anchored Mobility Node* mejora la conectividad *IP* de la red *WiMAX*, agrupando ciertas funcionalidades que permiten abarcar elementos como encaminadores, servidores *AAA (Authentication Authorization and Accounting)*, servidores de bases de datos e interconectividad con otros nodos *ASN* para formar un *CSN*³.

² Farinacci D. y Ti L. *GRE: Generic Routing Encapsulation. RFC 2784. www.ietf.org*

³ *Connectivity Service Network (CSN)*: Es la unión de varios nodos *ASN* de una red *WiMAX*.

4.4.6 Descripción de las Capas *MAC* y *PHY* de *WiMAX*

4.4.6.1 Capa *MAC* de *WiMAX*

Además de la capa *PHY*, la capa *MAC* de *WiMAX* posee ciertas características que pueden ser implementadas. La capa *MAC* no se restringe a solo a tramas de tamaño fijo, sino que puede permitir que tramas de tamaño variable sean transmitidas. [26]

El principal objetivo de la capa *MAC* de *WiMAX* es la de proveer una interfaz entre las capas superiores y la capa física. La capa *MAC* toma estos paquetes provenientes de las capas superiores denominados *MAC service data Units (MSDU)* y los organiza dentro de *MAC data Units (MPDU)* para su posterior transmisión.

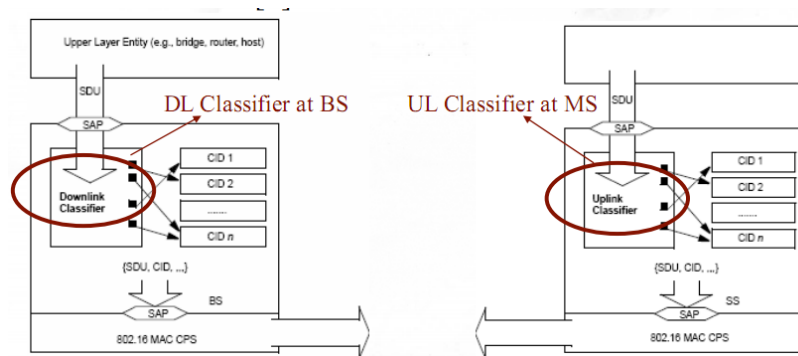
La capa *MAC* de *WiMAX* está diseñada para soportar altas tasas de transferencia a la vez que provee una buena confiabilidad en la calidad de servicio. La capa *MAC* utiliza longitudes variables de sus *MPDU* para ofrecer cierto grado de flexibilidad que permita una transmisión eficiente. El estándar *IEEE 802.16* soporta varios mecanismos mediante los cuales, un nodo *SS* puede solicitar y obtener el ancho de banda que requiera para el canal *uplink*. Dependiendo de los parámetros de calidad de servicio que se asocian a un servicio, uno o varios mecanismos pueden ser implementados por el nodo *SS*. La estación base, asigna recursos dedicados o compartidos de manera periódica a cada *SS*. Este proceso se llama *polling*. El proceso de *polling* se puede establecer tanto de manera individual (*unicast*) o bien en grupos (*multicast*). El proceso de *multicast polling* se realiza cuando no se le puede asignar suficiente ancho de banda a un nodo *SS*. [24]

La capa *MAC* se compone de tres sub capas que interactúan entre sí mediante *Service Access Points (SAP)*.

4.4.6.2 *MAC Service Specific Convergence Sublayer (CS)*

La sub capa *MAC Service Specific Convergence Sublayer (CS)*, es la que interactúa directamente con el tráfico proveniente de las capas superiores, usando como interfaz el *SAP (Service Access Point)*. Esta sub capa maneja la clasificación de paquetes y mapeo del tráfico proveniente de las capas superiores en un *scheduling type* específico (*UGS, ertPS, rtPS, nrtPS, BE*), el cual le da un nivel apropiado de calidad de servicio al canal de transmisión. También permite la supresión de cabeceras innecesarias, que impide que datos redundantes sean transmitidos, mediante reglas denominadas *Payload Header Supression (PHY)*, que especifican cuales *bytes* en la cabecera *MAC SDU* deben ser eliminados. En la figura 27 se observa el proceso de clasificación de tráfico en los nodos *BS* y *SS* de la red *WiMAX* en la sub capa *CS*.

Figura 27. Clasificación de tráfico en los nodos *BS* y *SS* en la sub capa *CS*.



Fuente: [28]

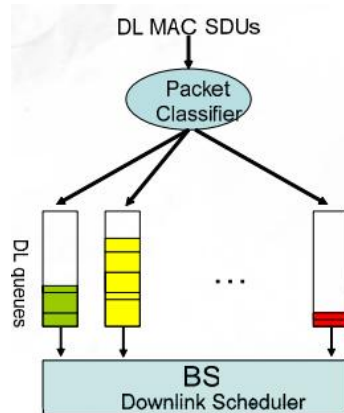
4.4.6.3 MAC Common Part Sublayer (CPS)

La sub capa *MAC Common Part Sublayer (CPS)*, administra las peticiones y concesiones de recursos de la red *WiMAX*. [24]. Otras funciones que posee la sub capa *CPS* se detallan a continuación y son observadas en la figura 29. [31]:

- ***PDU Operation***: Genera las tramas *MSDU* a ser transmitidas
- ***Connection Management***: Inicia y mantiene las conexiones entre los nodos.
- ***QoS Scheduling***: Planifica recursos de los enlaces aéreos y parametriza de los recursos de QoS.
- ***Airlink Control***: Controla los posibles errores de transmisión que se presenten en los canales de comunicación en la red *WiMAX*.
- ***Network Entry***: Asocia la entrada y salida de los nodos *SS* en cada nodo *BS*.
- ***Mobility Management***: Administrar los traspasos (*Handoff*) de los nodos *SS* en cada celda de la red.
- ***Power Management***: Economiza energía en las *SS* cuando no estén transmitiendo tráfico alguno.
- ***Multicast and Broadcast Service (MBS)***: Permite modos de operación *Multicast* y *Broadcast*

En la figura 28 se observa la clasificación de paquetes en una red *WiMAX* mediante el *Packet Classifier* asignando cada paquete a una cola específica dependiendo la prioridad del mismo para luego ser direccionado al *Download Scheduler* en el nodo *BS* el cual es el que asigna y administra los recursos a la red.

Figura 28. Clasificador de paquetes y asignación de prioridad en las colas.

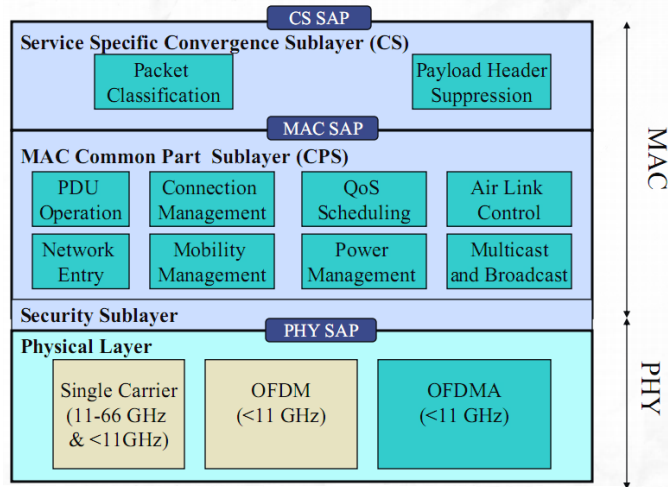


Fuente [28]

4.4.6.4 *Security (Privacy) Sublayer*

La sub capa *Security (Privacy) Sublayer*, es la encargada de proveer esquemas de autenticación, intercambio de claves de seguridad y cifrado de las *MSDU* que después son transferidas a la capa *PHY* [21]. En la figura 29 se observa la estructura de las capas *MAC* y *PHY* de la red *WiMAX*.

Figura 29. Esquema sub capas *MAC* y *PHY* del estándar *IEEE 802.16*



Fuente: [28]

4.4.7 Capa *PHY* de *WiMAX*

El mayor distintivo de la capa física de *WiMAX* es que puede proveer un alto rendimiento. Aplicaciones como *VoIP* requieren una cierto tipo de flexibilidad para sus transmisiones *downstream* de modo que se pueda brindar a los usuarios diferentes perfiles de rendimiento. A su vez, *WiMAX* soporta múltiples accesos para sus transmisiones *upstream*. [21]

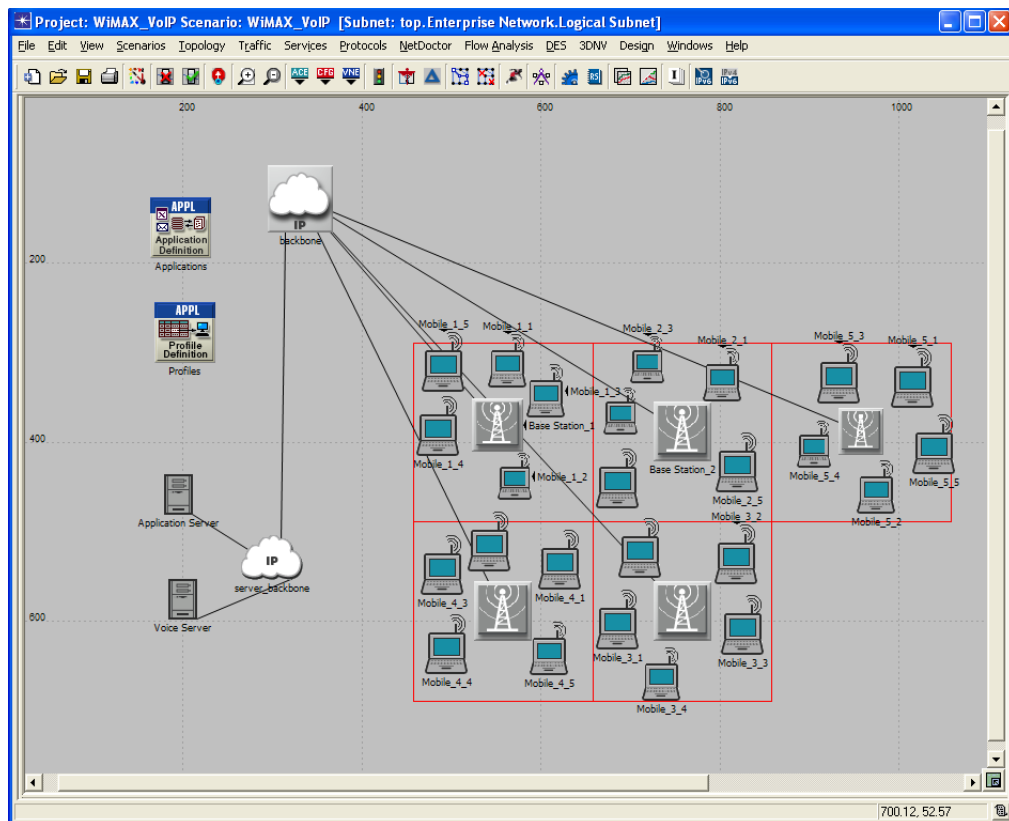
La capa física (*PHY*) del *WiMAX*, provee una gran flexibilidad en términos de modulación y codificación debido a que las estaciones suscriptoras pueden estar localizadas en diferentes lugares distantes de la estación base, pero esto claramente varia la relación señal a ruido del canal. La estación base dinámicamente ajusta parámetros tales como ancho de banda, modulación y esquemas codificación para compensar la degradación de la relación señal a ruido que algunas estaciones suscriptoras puedan experimentar. [21]

5 DESARROLLO DE LA TESIS

Para el desarrollo de este proyecto, se siguieron una serie de etapas, los cuales permitieron su ejecución de una manera clara y ordenada. Estas etapas se detallan a continuación.

En la figura 30 se observa el escenario de simulación que será aplicado en este capítulo en el cual se configuran dos servicios (voz y base de datos) mediante los nodos de configuración *WiMAX* explicados más adelante.

Figura 30. Escenario de prueba *WiMAX*



Fuente: Autores

5.1 INVESTIGACIÓN y DOCUMENTACIÓN

En esta etapa inicial se realizó una investigación global acerca de todos los temas necesarios para entender la estructura del proyecto, por ejemplo: cuál es el funcionamiento de una red *WiMAX*, porqué es importante soportar calidad de servicio multicapa, cual es la diferencia entre las diferentes arquitecturas de calidad de servicio en la capa *IP*, porqué es importante caracterizar las aplicaciones de red, entre otros cuestionamientos que se tenían para el desarrollo de este proyecto. Algunos de los temas a tratar, de modo que permitieran cumplir con los objetivos planteados, fueron los siguientes: *WiMAX*, *IPv4*, *QoS*, *OPNET Modeler*, *IntServ*, *DiffServ*, principales aplicaciones usadas en *Internet*, entre otros. Este proceso de Investigación y Documentación se llevó a cabo por medio de lecturas de libros, ayuda propia del *software* de simulación y archivos de *Internet*, de modo que permitiera organizar y clasificar la información de una manera fácil y sencilla.

5.2 FAMILIARIZACIÓN SOFTWARE SIMULACIÓN

En esta fase, lo primero que se hizo, fue realizar un proceso de familiarización con la interfaz gráfica de *software* de simulación. Una vez identificadas las partes principales de la *GUI* del simulador, se realizó un estudio detallado de las herramientas que *OPNET Modeler* ofrece para la implementación de una red *WiMAX* y de cada una de sus características que se requerían para implementar la red según nuestros objetivos. Para ello, se efectuó una exploración de cada objeto y sus particularidades. Se analizaron objetos como el *WiMAX Config Node*, *Application Config Node*, *Profile Config Node* y *Task Config Node* que serán explicados más adelante.

5.2.1 Objetos Requeridos para Desplegar una Red *WiMAX*

- ***WiMAX Config Node***: Este objeto es utilizado para almacenar los perfiles de la capa física además de los *Service Class*, los cuales son implementados en todos los nodos de la red *WiMAX*. También se definen los parámetros de QoS en una red *WiMAX* como *Maximum reserved traffic rate*, *Minimum reserved traffic rate*, *Maximum latency (ms)*, *Tolarated Jitter* y *Traffic Priority* que son descritos en la tabla 11.

Adicionalmente, en este objeto se puede configurar el modo de eficiencia que se va a implementar en la red *WiMAX*. Existen cuatro modos de eficiencia: *Efficiency Enabled*, *Framing Module Enabled*, *Physical Layer Enabled* y *Mobility and Ranging Enabled*.

A continuación, se definen estos cuatro modos de eficiencia.

OPNET *Modeler* presenta cuatro niveles de eficiencia para *WiMAX*, a través del atributo "*Efficiency Mode*" del nodo *WiMAX Config Node*; los cuales permiten incrementar la exactitud de cada simulación, dependiendo del objetivo de estudio y realización de la misma. A continuación se describen estos niveles de abstracción:

- •***Efficiency Enabled***: Su uso más común es para la capacidad de planificación y calidad de servicio. Provee indicación de retrasos más precisos.
- •***Framing Module Enabled***: Su más común es en aplicaciones de calidad de servicio y la planificación para la implementación de las mismas.

- •**Physical Layer Enabled**: Su uso más común es la transmisión en *PHY* y efectos de canal. Interferencia en el canal, desvanecimiento multi trayecto y efectos por pérdidas a causa de la trayectoria. Conexiones de difusión (*Broadcast*).
- •**Mobility and Ranging Enabled**: Movilidad y alcance habilitados. Modelado de movilidad y retrasos de exploración y *handoff*. *Ranging* inicial y periódico (retrasos, niveles de potencia de estaciones móviles <MS>).

Figura 31. *WiMAX Config Node*



Fuente: OPNET *Modeler* 14.0/14.5

- **Application Config Node**: Este nodo especifica las aplicaciones a implementar. Se puede especificar, crear y personalizar cada aplicación a simular. Este objeto, ofrece una diversidad de opciones para modificar los atributos de cada aplicación a implementar. También permite especificar los esquemas de codificadores (*codec*) a usar para generar tráfico de voz en la red *WiMAX*.

Figura 32. *Application Config Node*



Fuente: OPNET *Modeler* 14.0/14.5

- **Profile Config Node:** Este objeto es usado para crear los perfiles de las aplicaciones a usar en la red. Estos perfiles pueden ser aplicados a diferentes nodos de la red. Se pueden especificar por ejemplo, los parámetros de tráfico de cada aplicación. Este nodo define el modo operacional de las aplicaciones, como se explica a continuación:
- - **Serial (Ordered):** Las aplicaciones empiezan a generar tráfico una después de la otra siguiendo un orden secuencial (desde la primera fila hasta la última fila).
 - **Serial (Random):** Las aplicaciones pueden generar tráfico una después de la otra en modo aleatorio.
 - **Simultaneous:** Las aplicaciones pueden empezar al mismo tiempo a generar tráfico.

Figura 33. *Profile Config Node*



Fuente: OPNET *Modeler* 14.0/14.5

- **Task Config Node:** Este objeto, permite definir y crear parámetros que permitan caracterizar aplicaciones personalizadas. Estas aplicaciones son usadas para implementar perfiles, los cuales puedan ser utilizados en cualquier nodo de la red *WiMAX*, para generar un tipo de tráfico determinado.

Figura 34. *Task Config Node*



Fuente: OPNET *Modeler* 14.0/14.5

5.3 ESTUDIO RELACIÓN QoS MULTICAPA

A continuación se mencionan algunos estudios relacionados con el soporte de calidad de servicio multicapa en *WiMAX*:

En la propuesta de Yi-Ting Mai, Chun-Chuan Yang and, Yu-Hsuan Lin denominada “*Cross-Layer QoS Framework in the IEEE 802.16 Network*”, se propone un esquema de re-mapeo en las clases de servicio de la capa *IP* y capa *MAC* y su impacto en la eficiencia en la transmisión de datos a través de una red *WiMAX*. [32]

Jianfeng Chen, Wenhua Jiao, Qian Guo An en su propuesta “*Integrated QoS Control Architecture for IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems*”, definen una arquitectura integrada de QoS para el estándar *IEEE 802.16*. Basados en la propuesta *IEEE 802.16-2004 (WirelessMAN)*, se diseñó una regla de mapeo para *IntServ* y *DiffServ* bajo el modo *Point to Multi-point (PMP)*. [33]

En esta etapa se estudiaron los diferentes tipos de planificadores para el soporte de QoS en una red *WiMAX* y su relación *crosslayer* con la capa *IP*.

Los requerimientos de una aplicación definen el tipo de servicio (*ToS*) en la capa *IP* y capa *MAC* asociándola a una clase de servicio. Considere por ejemplo, un servicio de *VoIP*. Con el propósito de proveer el estándar para voz con

características de QoS las clases de servicio *UGS* o *ertPS* deben ser usadas en la capa *MAC* porque la voz está diseñada para ser intolerante a retrasos en los paquetes (aplicación no elástica).

La calidad de servicio en la capa *IP* usa los primeros 6 *bits* del *ToS* de la cabecera del paquete *IP*. Para esto, existen dos propuestas comúnmente conocidas de QoS: *IntServ* y *DiffServ*. *DiffServ* usa estos 6 *bits* para codificar diferentes clases de servicio. Por ejemplo, dependiendo del valor del campo *ToS* de un paquete, este paquete es tratado de una manera diferente en todos los nodos de la red, como pasa con *Expedited Forwarding (EF)* para *VoIP*.

A continuación se detalla la funcionalidad que posee *OPNET Modeler* para relacionar (mapear) el tráfico proveniente de la capa *IP* con las clases de servicio en la capa *MAC* (*UGS*, *ertPS*, *rtPS*, *nrtPS*).

Nodos tales como Estaciones Base (*BS*), Estaciones Suscriptoras (*SS*) y Estaciones Móviles (*MS*), poseen un atributo denominado *Classifier Definitions*. Para buscarlo, dar clic derecho sobre en cada nodo, elegir *Edit Attributes>WiMAX Parameters>Classifier Definitions*. El atributo *Classifier Definitions* permite relacionar el tráfico de la capa *IP* con las clases de servicio de la capa *MAC*. Cada relación de tráfico consiste en un criterio previo y una correspondiente clase de servicio. La figura para este propósito está compuesta de tres columnas, *Type of SAP* (escoger *IP*), *Traffic Characteristics* y *Service Class Name* (ver figura 36). En *Traffic Characteristics* se indica el tipo de tráfico que se tiene en la capa de red, por ejemplo, *Interactive Voice*. En *Service Class Name* se indica la clase de servicio correspondiente a *WiMAX* que se requiera.

Ejemplo de configuración de un servicio de voz y datos (base de datos). En la opción *WiMAX Config Attributes>MAC Service Class Definitions* del *WiMAX Config*

Node establecer los tipos de servicio *Gold* y *Bronze* como se muestra en la figura 35.

Figura 35. *MAC Service Class Definitions Table*

	Service Class Name	Scheduling Type	Maximum Sustained Traffic Rate (bps)	Minimum Reserved Traffic Rate (bps)	Maximum Latency (milliseconds)
0	Gold	UGS	96000	96000	10
1	Bronze	Best Effort	384 Kbps	384 Kbps	30.0

Fuente: Autores

Se explicarán los campos *Service Class Name* y *Scheduling Type* de la figura 35.

- **Service Class Name:** Este atributo se relaciona para asociar para definir las características de un *Service Flow*.
- **Scheduling Type:** Este atributo especifica los mecanismos para petición y asignación de ancho de banda para cualquier conexión en la red *WiMAX*.

Luego, en cada uno de los nodos (*BS/MS/SS*) configurar la opción *Classifier Definitions* como se muestra en la figura 36. Para esto dar clic derecho en los nodos *BS/MS/SS*>*Attributes*>*WiMAX Parameters*>*Classifier Definitions*.

Figura 36. *Classifier Definitions Table*

	Type of SAP	Traffic Characteristics	Service Class Name
0	IP	(...)	Gold
1	IP	(...)	Bronze

Fuente: OPNET *Modeler* 14.0/14.5

Los campos de la figura 36 son descritos a continuación:

- **Type of SAP:** Este atributo especifica el *Service Access Point*. Este atributo está relacionado con la sub capa *MAC Service Specific Convergence Sublayer (CS)*. *OPNET Modeler* sólo soporta en sus versiones 14.0/14.5 la relación del *SAP* con la capa *IP*, en versiones anteriores esto no es posible.

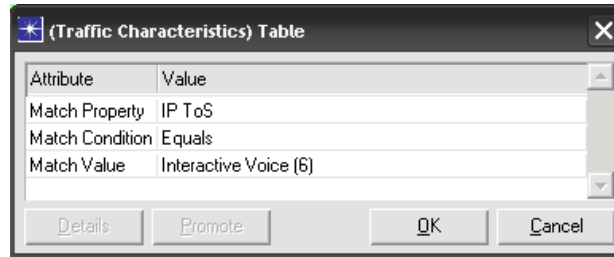
-

En el campo *Traffic Characteristics*, se pueden ver los siguientes atributos:

- **Match Property:** Este atributo especifica el tipo de relación de los paquetes *IP*. Esta relación se puede configurar de diferentes maneras:
 - ✓ Dirección *IP* origen y destino.
 - ✓ Puerto origen y destino, relacionados con los protocolos *TCP/UDP*.
 - ✓ Tipo de servicio (*ToS*) en el datagrama *IP* que debe ser igual al campo de precedencia en *DSCP*.
- **Match Condition:** Este atributo especifica la relación entre *Match Property* y *Match Value*.
- **Match Value:** Este atributo especifica la relación correspondiente al valor que se fijó en el atributo *Match Property*.

En la figura 37 se configura en el clasificador el parámetro *Traffic Characteristics* para la clase de servicio *Gold* (1ra Fila).

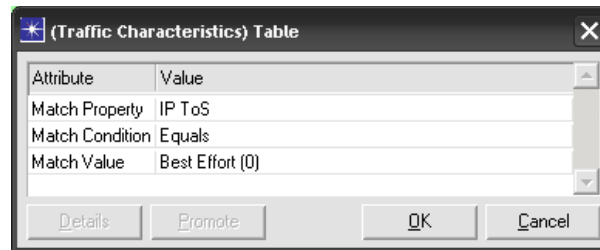
Figura 37. *Traffic Characteristics* para *Gold*



Fuente: Autores

En la figura 38 se configura en el clasificador el parámetro *Traffic Characteristics* para la clase de servicio *Bronze* (2da Fila)

Figura 38. *Traffic Characteristics* para *Bronze*



Fuente: Autores

Las figuras *Traffic Characteristics* (figuras 37 y 38) proveen la codificación de *ToS* (definidas con nombres en lugar de números) y las clases de servicio para *DiffServ* (desde *Assured Forwarding* hasta *Expedited Forwarding*).

5.4 IMPLEMENTACIÓN RELACIÓN QoS MULTICAPA

En esta etapa se efectuaron las pruebas correspondientes en los diferentes escenarios implementando una calidad de servicio multicapa y su impacto en

rendimiento y confiabilidad en las aplicaciones que se ejecutan sobre una red *WiMAX*.

Se realizaron varias simulaciones, basándose en varios aspectos como movilidad, *handoff* forzado (asignación de estaciones suscriptoras a las estaciones base, dependiendo la capacidad existente en una determinada celda *WiMAX*), continuidad en el servicio⁴, *handoff* y escenarios estáticos.

Los nombres de los escenarios que se simularon para la presente tesis, se listan a continuación:

- QoS Multicapa con aplicaciones Voz y *Ftp*.
- QoS Multicapa con aplicaciones Voz y Tráfico *Web*.
- QoS Multicapa con aplicaciones Video y Correo Electrónico.
- Movilidad con *Handoff* Forzado.
- Movilidad con *Access Service Network (ASN)*.

En la tabla 10, se mencionan los escenarios que fueron simulados en la presente tesis.

⁴ El objetivo principal del proceso de Gestión de la Continuidad del Servicio de TI (Tecnologías de Información) es asegurar la continuidad en la ejecución de los servicios y la normal operación de los procesos en una red.

Tabla 10. Descripción escenarios tesis

ENTORNO	NOMBRE ESCENARIO	OBJETIVO
USUARIOS ESTÁTICOS	QoS Multicapa con aplicaciones Voz y <i>FTP</i>	Analizar los requerimientos de calidad de servicio multicapa en una red <i>WiMAX</i> con topología punto multi punto con aplicaciones voz y <i>FTP</i> .
	QoS Multicapa con aplicaciones Voz y Tráfico <i>Web</i>	Analizar el comportamiento del trafico de las aplicaciones voz (<i>PCM Quality Speech</i>), y tráfico <i>web (HTTP Heavy Browsing)</i> en una red <i>WiMAX</i> en configuración <i>PMP (Point to Multipoint)</i> .
	QoS Multicapa con aplicaciones Video y Correo Electrónico.	Analizar requerimientos de calidad de servicio multicapa en una red <i>WiMAX</i> con configuración <i>PMP</i> con aplicaciones video y correo electrónico.
USUARIOS MÓVILES	Movilidad con <i>Handoff</i> Forzado	Analizar los requerimientos de calidad de servicio multicapa en una red <i>WiMAX</i> con aplicación voz en un escenario de movilidad con <i>Handoff</i> iniciado por las estaciones bases y su impacto en la continuidad de servicio.
	Movilidad con <i>Access Service Network (ASN)</i> .	Analizar el comportamiento de la aplicación voz en un entorno de movilidad con <i>Access Service Network (ASN)</i> .

Fuente: Autores

5.5 PARAMETRIZACIÓN DE APLICACIONES PARA SOPORTE DE QoS

Basado en los resultados arrojados por los escenarios, se procedió a caracterizar las aplicaciones implementadas de acuerdo a sus parámetros de calidad de servicio, y cómo estos están relacionados con las opciones propias del *WiMAX Config Node*.

De acuerdo a lo anterior, se analizaron e implementaron reglas de mapeo que permitiesen mejorar el rendimiento de las aplicaciones simuladas de acuerdo a las condiciones del canal de transmisión, y de cómo pueden interactuar las aplicaciones elásticas y no elásticas sin afectar su rendimiento.

En la tabla 11 se listan los parámetros de calidad de servicio que se implementan en el estándar *IEEE 802.16* y sus definiciones.

Tabla 11. Definición parámetros de QoS usados en WiMAX

Parámetros de QoS	Definición
<i>Maximum reserved traffic rate</i>	Tasa máxima de transferencia.
<i>Minimum reserved traffic rate</i>	Cantidad mínima promedio de tráfico transportado.
<i>Maximum latency (ms)</i>	Tiempo máximo permitido entre el ingreso de un paquete a la sub capa de convergencia y el direccionamiento de SDU ⁵ al medio para ser transmitido.
<i>Tolarated Jitter</i>	Máxima variación del retardo soportada para la conexión.
<i>Traffic Priority</i>	Prioridad asignada a un flujo de servicio.

Fuente: [31]

En la tabla 12, se muestra la caracterización de las aplicaciones basadas en sus parámetros de QoS en una red WiMAX. Se relaciona el tipo de servicio y los parámetros de QoS a las aplicaciones elásticas e inelásticas simuladas en esta tesis, para una correcta asignación de recursos.

⁵ SDU (*Service Data Unit*): Datos enviados de una capa a otra capa del modelo OSI.

Tabla 12. Caracterización aplicaciones relacionadas con parámetros de QoS en WiMAX

Tipo de Servicio	Parámetros de QoS	Aplicación
<i>Unsolicited Grant Service (UGS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Maximum sustained rate(bps)</i> • <i>Minimum reserved traffic rate (bps)</i> • <i>Tolerated Jitter⁶</i> • <i>Maximum latency (ms)</i> 	T1-E1, Voz sobre IP (PCM Quality Speech) ⁷
<i>Extended real-time Polling service (ertPS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Maximum sustained rate</i> • <i>Minimum reserved traffic rate (bps)</i> • <i>Maximum latency (ms)</i> • <i>Tolerated Jitter</i> • <i>Traffic Priority⁸</i> 	Voz sobre IP con supresión de silencio
<i>Real-time Polling service (rtPS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Maximum sustained traffic rate</i> • <i>Minimum reserved traffic rate</i> • <i>Maximum latency (ms)</i> • <i>Traffic Priority</i> 	Audio y video (MPEG)
<i>Non-real-time Polling service (nrtPS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Minimum reserved traffic rate</i> • <i>Maximum sustained rate</i> • <i>Traffic Priority</i> 	FTP (File Transfer Protocol)
<i>Best-effort service (BE)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Maximum sustained rate</i> • <i>Traffic Priority</i> 	HTTP, correo electrónico.

Fuente: Autores

⁶ No soportado en OPNET Modeler 14.0/14.5

⁷ PCM Quality Speech es un esquema de voz asociado al esquema de codificación G.711 con altos requerimientos de QoS.

⁸ No soportado en OPNET Modeler 14.0/14.5

5.5.1 Tipos de Tráfico y sus Requerimientos de Calidad de Servicio [8]

Muchas aplicaciones trabajan apropiadamente con servicios *Best Effort*, mientras que otras aplicaciones requieren parámetros de QoS más precisos que provean garantías para su correcto funcionamiento en la red.

5.5.1.1 Tipos de Aplicaciones de Red [8]

Cada aplicación, probablemente posea requerimientos únicos de calidad de servicio. Sin embargo, las aplicaciones se pueden catalogar mediante ciertos esquemas clasificación. Se describirá a continuación uno de los esquemas de clasificación.

5.5.1.2 Aplicaciones Elásticas y no Elásticas [8]

Una aplicación elástica es capaz de adaptarse a los cambios de parámetros de calidad de servicio. Las aplicaciones elásticas, se asocian al término de aplicaciones *Best Effort*. Tráfico *http* y correo electrónico son ejemplos de aplicaciones elásticas, ya que ellas no requieren un ancho de banda garantizado o limitaciones de retardo. En caso de que exista un reducido ancho de banda en el canal de transmisión, estas aplicaciones solo retrasarían en el peor de los casos su tráfico.

Las aplicaciones no elásticas requieren de garantías de calidad de servicio. A esta clase pertenecen casi todas las aplicaciones de tiempo real, pero algunas poseen cierto grado de tolerancia a los cambios de los parámetros de calidad de servicio. Por ejemplo, una video conferencia, se puede adaptar a un ancho de banda más reducido mediante el uso de codificaciones más eficientes. Sin embargo, se requiere un mínimo ancho de banda para que hasta el más eficiente de los

codificadores transmita de manera correcta. Además, los requerimientos para los retrasos de la señal, son exigentes en la mayoría de los casos. [8]

5.5.2 Requerimientos de QoS

5.5.2.1 Tráfico de Audio

Las transmisiones de audio, normalmente tienen unos variados requerimientos de ancho de banda, dependiendo si es el tráfico a transmitir es de alta o baja calidad. Además de los métodos de codificación a implementarse en el tráfico de voz, se debe tener en cuenta las cabeceras que añaden los protocolos *IP*, *TCP* ó *UDP* y *RTP*. Los paquetes más grandes, reducen la esta carga de la cabecera porque varias muestras de audio son transmitidas en un solo paquete, pero esto puede incrementar el retardo.

El tráfico de audio tolera un máximo retardo extremo-extremo de 150 ms. La variación del retardo también debe ser limitada. Las aplicaciones de audio, son muy sensibles a la pérdida de paquetes, por consiguiente se debe garantizar la menor pérdida de tráfico posible.

Las señales de voz son muestreadas y digitalizadas. Luego, son codificadas. Existen varios codificadores comerciales disponibles, como lo son el G.711, G.723, G.729. Las muestras de voz son luego empaquetadas y transmitidas usando *RTP/UDP/IP*. En el extremo receptor, el tráfico de voz es desempaquetado y decodificado.[8]

5.5.2.2 Efectos del Retardo (Delay) en la Voz

En un sistema *VoIP*, el *delay* extremo-extremo se tiene tres componentes: *codec delay* (*dcodec*), *playout delay* (*dplayout*), y *network delay* (*dnetwork*). El *codec delay* representa el retardo que genera el algoritmo del codificador implementado en el proceso de empaquetamiento. Este retardo, varía dependiendo del *codec* usado, por ejemplo, el *codec* G729.a introduce un retardo en la voz de 25 ms. El *playout delay* (*playback delay*), es el retardo asociado para disminuir el *delay* del tráfico entrante en el nodo receptor. El *network delay* es el retardo introducido por los dispositivos de red a lo largo de la ruta (por ejemplo, encaminadores), de modo que el retardo total es: [18]

$$total_delay = dcodec + dplayout + dnetwork \quad (\text{Ecuación 1})$$

Fuente: [21]

5.5.2.3 Probabilidad de Reposición de Paquetes

Cuando al receptor llegar un paquete corrupto, este no está en posición de corregir los errores. Sin embargo, algunos *bits* de redundancia usados para *FEC* (*Forward Error Correction*) son implementados antes de la transmisión de los paquetes, con esto, hay la probabilidad de que el nodo receptor detecte los paquetes corruptos y los corrija. [21]

Además de las mejoras que tiene la implementación de un sistema *FEC* en una red *WiMAX*, el rendimiento se puede mejorar aún más si un mecanismo de *ARQ*⁹ (*Automatic Repeat Request*), se habilita. El mecanismo de *ARQ* se establece en la sub capa *Common Part Sublayer* mediante el intercambio de mensajes entre el nodo transmisor y el nodo receptor en el proceso de establecimiento de la

⁹ *ARQ*: Mecanismo de control en la transmisión de datos.

conexión entre estos dos nodos. El método de *ARQ* permite entre otras, que el nodo transmisor conozca el estado del canal de transmisión y la calidad de la llamada de voz en todo momento, de modo que este nodo restablezca la retransmisión de paquetes, este proceso se gestiona en la sub capa *CPS*, de modo que ésta sub capa reciba la información de si el paquete se ha entregado satisfactoriamente o no. Además, este procedimiento da una idea del estado del canal de transmisión. [21]

5.5.2.4 Tráfico de Video

Algunos parámetros para las aplicaciones de audio, aplican también para las aplicaciones de video. Audio y video, comparten muchas características en común, referente a parámetros de calidad de servicio. Sin embargo, existen ciertas diferencias entre estas. La más importante, es que las aplicaciones de video requieren de un ancho de banda más grande, dependiendo del nivel de calidad requerido. Mientras que un dispositivo portátil o un computador pueden mantener video conferencias incluso a una tasa de transferencia del nivel de *Kbps*, la televisión de alta definición requiere de tráfico alrededor de los *Mbps*. Los requerimientos de ancho de banda dependen de varios parámetros, como profundidad del color, resolución, tamaño de la pantalla, tasa de *frames*, entre otros.

Las conexiones para flujo de video funcionan bajo el protocolo *UDP (User Datagram Protocol)*, el cual provee un servicio de *Best Effort*, sin garantías de calidad de servicio, en parámetros tales como retardo, pérdida de paquetes ó ancho de banda. Contrario al protocolo *TCP (Transmission Control Protocol)*, *UDP* no es orientado a conexión, no es confiable, no provee control de flujo ni control de congestión. La falta mecanismos de confiabilidad y control de congestión, son características deseables en el tráfico de video porque los servidores de video

pueden proveer este servicio sin ser obligados a retransmitir un paquete por el control de congestión si este no es transmitido correctamente.

Los segmentos *UDP* son subsecuentemente encapsulados dentro de datagramas *IP* para su correcto direccionamiento y enrutamiento hacia los clientes. Los datagramas *IP* pueden perderse debido a un desbordamiento en el *buffer* ó retrasados debido a la congestión en el encaminador, lo cual afecta el flujo del tráfico de video y su correcta reproducción en el cliente de video. Para esto, en los clientes implementan un esquema de *buffering* para intentar compensar la pérdida de paquetes y la variación del tráfico. El objetivo principal es mantener una tasa constante de tráfico para su correcta reproducción en el cliente, que coincida con la tasa de transferencia a la cual el servidor está ofreciendo el tráfico. Los datagramas *IP* pasan a través de las capas *MAC* y *PHY* para luego propagarse a través de *Internet* hacia el cliente de video. Las estaciones receptoras, almacenan, decodifican y reproducen los *frames* a una tasa constante. [25]

5.5.2.5 Tráfico de Datos

Transferencia de archivos, correo electrónico, tráfico *web* hacen parte de esta categoría. Dado que existen miles de aplicaciones de tráfico de datos, es imposible caracterizarlas a todas. Cada aplicación posee unos requerimientos únicos de calidad de servicio. Inclusive diferentes versiones de la misma aplicación, pueden requerir diferentes parámetros de calidad de servicio para su tráfico [25]

En las tablas 13, 14 y 15 se describen la relación parámetros de calidad de servicio multicapa para las aplicaciones simuladas. Esta relación, permitió optimizar el rendimiento de las aplicaciones elásticas (correo electrónico, tráfico *Web* y *FTP*) e inelásticas (voz y video) estudiadas en la presente tesis.

Tabla 13. Relación parámetros multicapa aplicación Voz

Aplicación	IP QoS	MAC QoS	MAC Maximum Latency(ms)	Maximun Sustained Traffic Rate (bps)	Esquema de Codificación
Voz (<i>PCM Quality Speech</i>)	<i>Interactive Voice(6)</i>	<i>UGS ó ertPS</i>	10	96000	G.711
Voz (<i>IP Telephony</i>)	<i>Interactive Voice(6)</i>	<i>UGS ó ertPS</i>	10	64000	G.711

Fuente: Autores

Tabla 14. Relación parámetros multicapa aplicación Video (*VCR Quality Video*)

Aplicación	IP QoS	MAC QoS	MAC Maximum Latency(ms)	Maximun Sustained Traffic Rate (bps)	Frame Interarrival Time Information(frames/sec)
Video (<i>VCR Quality Video</i>)	<i>Streaming Multimedia (4)</i>	<i>rtPS</i>	15	1000000	30

Fuente: Autores

Tabla 15. Relación parámetros multicapa aplicación *FTP (File Transfer Protocol)*

Aplicación	IP QoS	MAC QoS	MAC Maximum Latency(ms)	Maximun Sustained Traffic Rate (bps)
<i>FTP (File Transfer Protocol)</i>	<i>Best Effort (0)</i>	<i>nrtPS</i>	N.A.	10000

Fuente: Autores

5.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta etapa se analizaron los resultados de la implementación de una calidad de servicio multicapa en una red *IEEE* 802.16, y su impacto en el rendimiento de las aplicaciones simuladas, detallando estos resultados con graficas y datos estadísticos.

5.6.1 QoS Multicapa con Aplicaciones Voz y FTP¹⁰

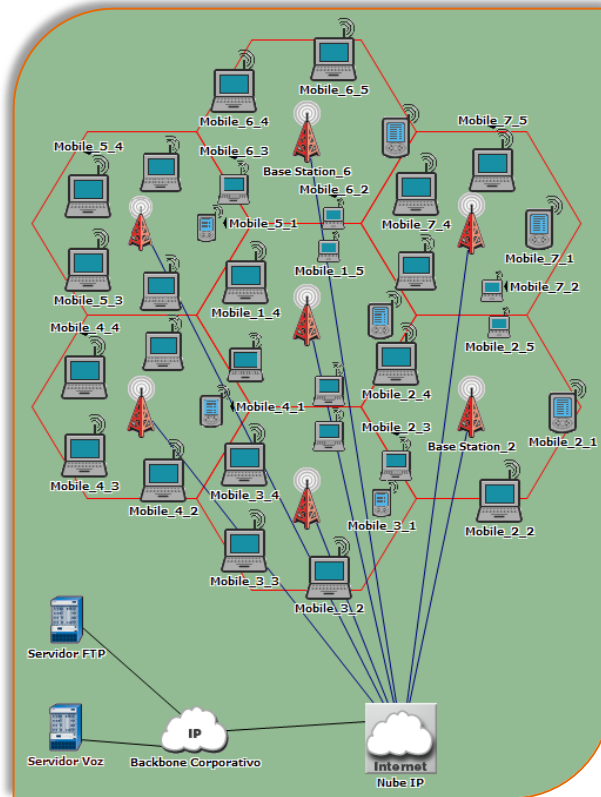
5.6.1.1 Objetivo

Analizar los requerimientos de calidad de servicio multicapa en una red *WiMAX* con topología punto multi punto con aplicaciones voz y *FTP*.

¹⁰ Basado en *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies. Opnetwork 2007.

5.6.1.2 Descripción del Escenario

Figura 39. Descripción del escenario



Fuente: Autores

En este escenario (figura 39) se desplegará una red *WiMAX* conformada por 7 celdas con 5 nodos *SS (Subscriber Station)* estáticos y 1 nodo *BS (Base Station)* en cada una. Se examinarán dos aplicaciones voz y *FTP*, la primera con altos requerimientos de calidad de servicio y la segunda aplicación sin mayores requerimientos de parámetros de calidad para la transferencia de información.

El modo de operación utilizado es *PMP (Point-to-Multipoint)* soportado en el estándar *IEEE 802.16*.

Todos los nodos SS podrán realizar transferencias vía *FTP* pero sólo un nodo suscriptor en cada celda, podrá realizar llamadas de voz.

Inicialmente se hará un análisis usando la regla de mapeo de la tabla 16 para voz y *FTP*:

Tabla 16. Mapeo implementado

Servicio	IP QoS	MAC QoS
Voz	<i>Interactive Voice (6)</i>	<i>UGS</i>
Tráfico <i>FTP</i>	<i>Best Effort (0)</i>	<i>nrtPS</i>

Fuente: Autores

En este escenario esta regla de mapeo es asociada solo a la aplicación voz, por ser intolerante al retraso y al *jitter* entre otros parámetros de calidad de servicio. La aplicación *FTP* está asociada un servicio tipo *Best Effort* en la capa *IP* y en la capa *MAC* está asociado a un *Scheduling Type nrtPS*.

A continuación se describirán los parámetros de simulación:

Parámetros de funcionamiento, de acuerdo al perfil *PHY Wireless MAN SC P1*:¹¹

- Ancho de banda: *25 Mhz* (cada *MS*)
- Frecuencia de operación: *10 Ghz*.
- Multiplexación: *TDD (Time Division Duplexing)*.
- Modo de eficiencia implementado: *Efficiency Enabled*

¹¹ *PHY Wireless MAN SC P1*: Perfil de la capa física de *WiMAX* que se asocia a todos los nodos de la red.

Parámetros técnicos del escenario:

- Potencia de la estación base: 5 W
- Potencia de los nodos SS: 0.5 W
- Modulación implementada: *Adaptive Modulation (QPSK ½ y QPSK ¾)*
- Esquema de codificación: G.711
- Radio de las celdas: 200 metros
- *Pathloss Parameter: Pedestrian ("Outdoor to Indoor and Pedestrian Environment")*¹²
- *Pathloss Model: Free Space*
- *Terrain Type: Terrain Type A*¹³

A continuación se van a parametrizar las aplicaciones:

Para la aplicación voz, se modificará el *Service Class* del *WiMAX Config Node: GOLD* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: UGS*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 64000*
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 64000*
- *Maximum Latency(milliseconds) :30*

¹² Descrito en "*Radio TX Technologies for IMT2000*" ponencia blanca de la ITU.

¹³ Corresponde a un terreno accidentado con densidad moderada de árboles.

Para la aplicación *FTP*, se modificará el *Service Class* del *WiMAX Config Node: SILVER* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: nrtPS*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 10000*
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 10000*

5.6.1.3 Variables a Medir

Las estadísticas que se utilizarán para la simulación se observan en la tabla 17.

- Los valores *Node Statistic* son tomadas en el nodo *SS_1_1* del escenario actual.

Tabla 17. Estadísticas usadas en el escenario

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	TIPO ESTADISTICA
<i>Load (bits/sec)</i>	Tráfico incidente	<i>Node Statistic</i>
<i>Throughput (bits/sec)</i>	Tráfico transmitido	<i>Node Statistic</i>
<i>Delay End to End (sec)</i>	Retardo extremo-extremo	<i>Global Statistic</i>
<i>Jitter (sec)</i>	Variación retardo	<i>Global Statistic</i>
<i>Traffic dropped (bits/sec)</i>	Tráfico rechazado	<i>Node Statistic</i>
<i>Queue Size (bytes/sec)</i>	Encolamiento Tráfico	<i>Global Statistic</i>

Fuente: Autores

5.6.1.4 Metodología

A continuación se describe la metodología utilizada en esta prueba:

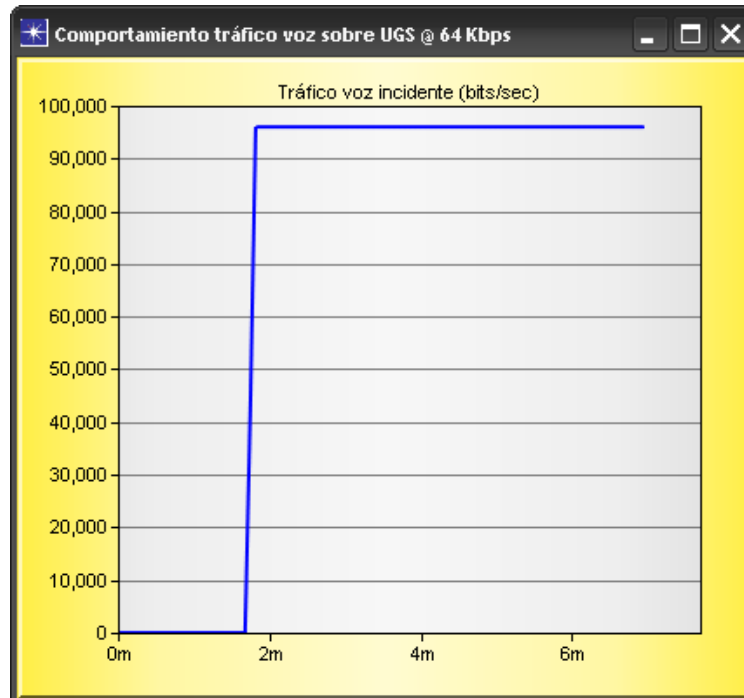
1. Se analizará el rendimiento en el tráfico de voz incidente en la red mediante los parámetros descritos en la tabla 17.
2. Se ajustan los parámetros de QoS para obtener un mejor rendimiento de la aplicación de voz y su impacto sobre el rendimiento de la aplicación *FTP*.
3. Se ajustan los parámetros de QoS para obtener un mejor rendimiento de la aplicación *FTP* sin afectar el rendimiento de la aplicación de voz.

5.6.1.5 Análisis de Resultados

En la figura 40 se puede observar que el tráfico generado por cada nodo suscriptor para la aplicación voz en la red *WiMAX* es de aproximadamente 96000 *bps*. Cada paquete de voz tiene 640 *bits*, una llamada de voz genera 100 paquetes por segundo, para un total de 64000 *bps*¹⁴. A este tráfico se le agregan 160 *bits* de cabecera en la capa *IP* y *TCP* respectivamente.

¹⁴ Basado en: *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies. Opnetwork 2008.

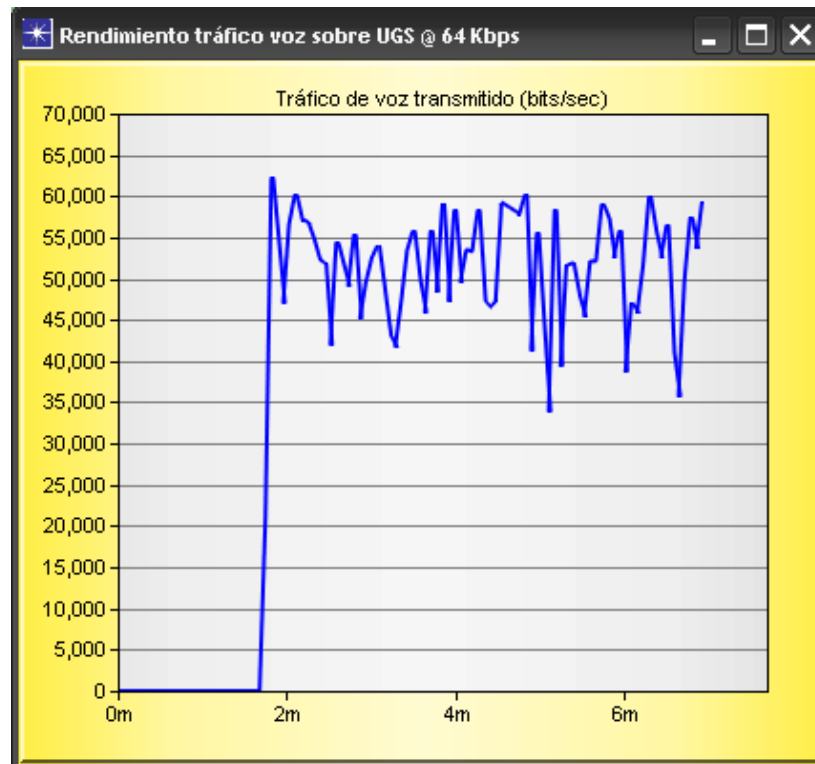
Figura 40. Tráfico incidente voz sobre conexiones *UGS* @ 64 Kbps en el nodo *SS_1_1*.



Fuente: Autores

Como se observa en la figura 41, el ancho de banda del tráfico de voz en la red es limitado, debido a la falta de recursos disponibles para ofrecer una adecuada calidad de servicio a esta aplicación. Esta falta de recursos disponibles en la red *WiMAX* se debe porque solo fueron asignados 64 Kbps de ancho de banda para esta aplicación, y no se tuvieron en cuenta las cabeceras que agregan la capa *IP* y la capa *TCP* al tráfico de voz *PCM Quality Speech*. Para solucionar esta limitación, se debe configurar en la red *WiMAX* una relación multicapa de calidad de servicio, donde sea garantizado el correcto rendimiento de las aplicaciones de red.

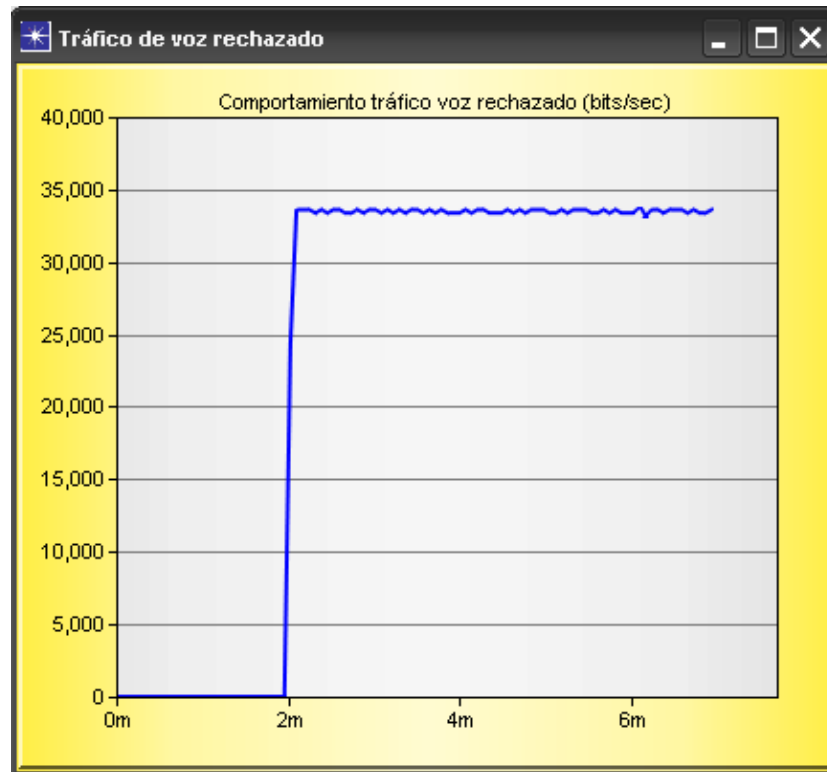
Figura 41. Ancho de banda tráfico voz sobre conexiones *UGS* @ 64 Kbps en el nodo *SS_1_1*.



Fuente: Autores

En la figura 42 el tráfico rechazado es notablemente elevado, llegando a los 33 Kbps aproximadamente. Esto es debido al limitado ancho de banda disponible en la red *WiMAX* para el servicio de voz.

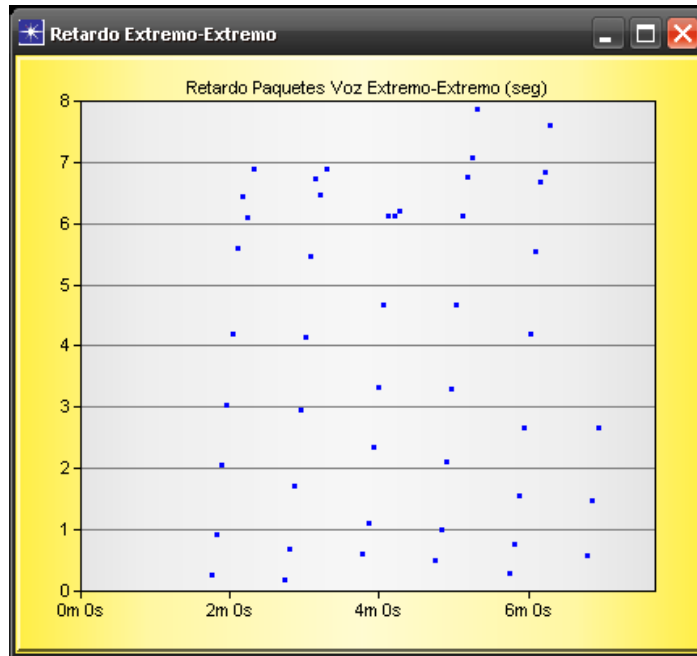
Figura 42. Paquetes de Voz rechazados con *UGS* @ 64 Kbps en el nodo SS_1_1.



Fuente: Autores

En la figura 43 que el retardo extremo-extremo de la aplicación voz al momento de ser transmitido a través de la red *WiMAX* es considerablemente elevado [8], produciendo una reducción notable en su rendimiento, lo que es inaceptable en un tráfico sensible a retardos.

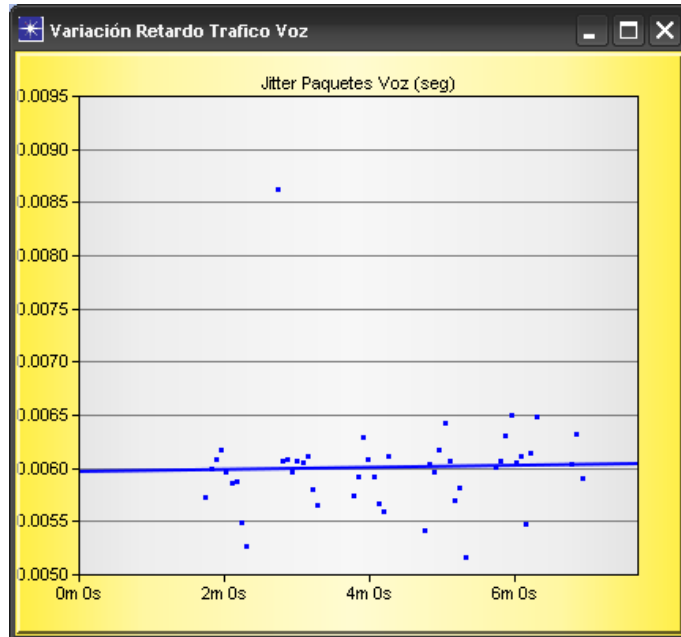
Figura 43. Retardo Paquetes de Voz Extremo-Extremo con *UGS @ 64 Kbps* red *WiMAX*



Fuente: Autores

En la figura 44 se observa la variación del retardo, que debería ser idealmente de cero segundos, bajo condiciones ideales, en este caso existe un promedio aproximado de 0.0060 segundos, generado por las características del ancho de banda del canal de transmisión.

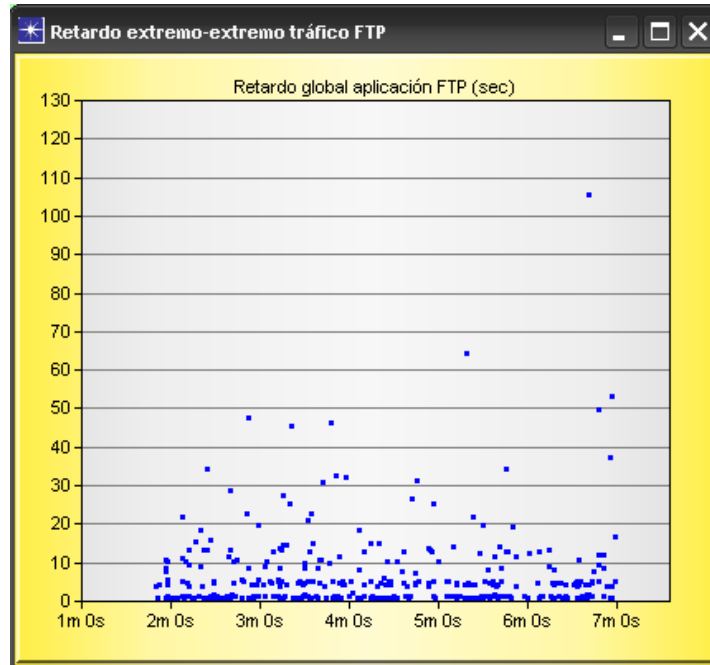
Figura 44. Variación Retardo Paquetes de Voz con UGS @ 64 Kbps red WiMAX



Fuente: Autores

A continuación se observa en la figura 45 el retardo extremo-extremo de la transferencia de datos mediante la aplicación *FTP*. Aunque este retardo es elevado, el impacto en el rendimiento de la aplicación *FTP* no es dramático por tratarse de una aplicación elástica, pero aun así sería deseable buscar los métodos para intentar disminuir este retardo.

Figura 45. Retardo tráfico *FTP* extremo-extremo en la red *WiMAX*



Fuente: Autores

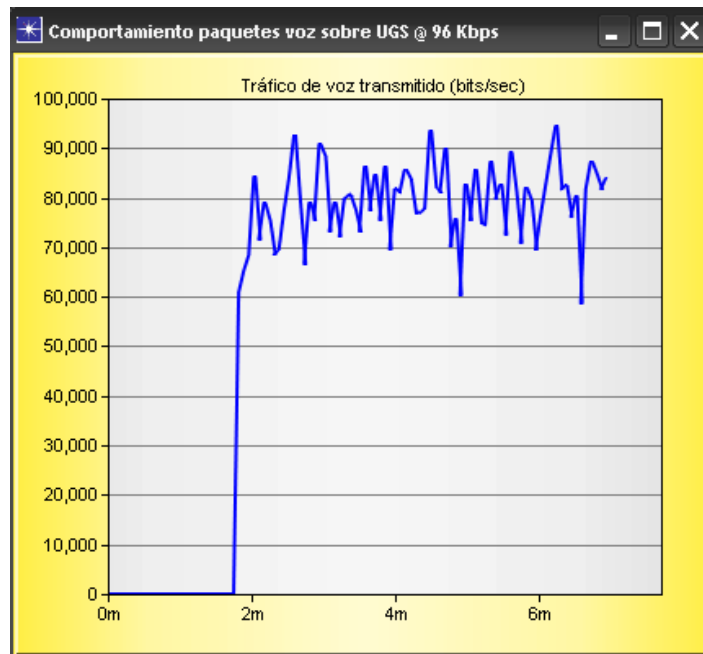
A continuación se observará el cambio de los *MAC Service Class Definitions* en el *WiMAX Config Node* relacionados con la aplicación voz y su impacto en su rendimiento.

- *Scheduling Type: UGS*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 96000*
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 96000*
- *Maximum Latency(milliseconds) :10*

El ancho de banda para la aplicación voz es ahora de 96 *Kbps*. Esto es debido a los 64 *Kbps* del tráfico generado por esta aplicación, adicional a los 32 *Kbps* de cabeceras agregados cada una de las capas de red y de transporte.

Se puede apreciar en la figura 46 que el ancho de banda de la aplicación de voz en la red *WiMAX* aumenta considerablemente. Las variaciones del tráfico de voz en la red *WiMAX* son causados por las interferencias del aire, los obstáculos en la trayectoria y por los mismos nodos de la red como encaminadores.

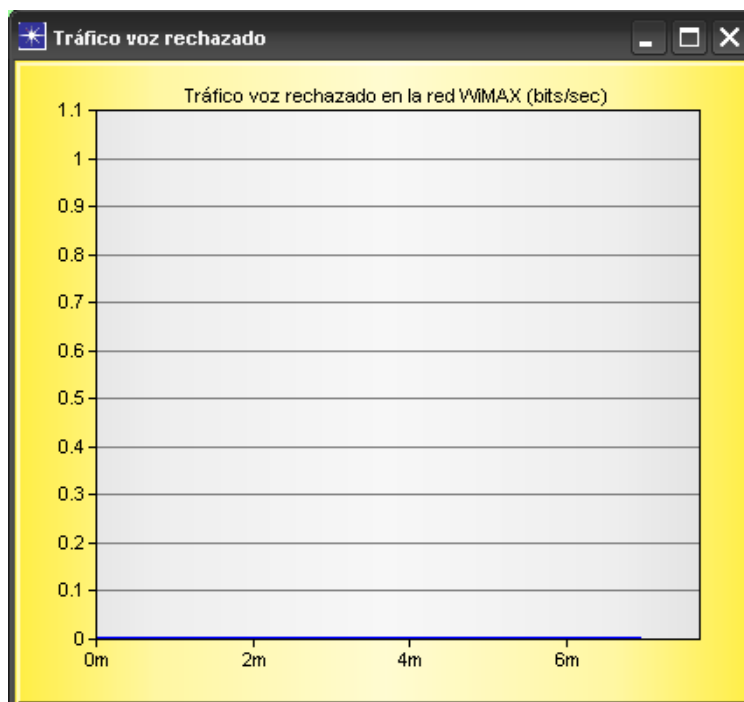
Figura 46. Rendimiento tráfico de voz sobre conexiones *UGS @ 96 Kbps* en el nodo *SS_1_1*



Fuente: Autores

En la figura 47 se observa que el tráfico rechazado es nulo, ya que se realizó una correcta relación de parámetros de calidad de servicio multicapa para la aplicación voz. Por consiguiente el canal de transmisión ofrece condiciones óptimas para la transferencia de tráfico de voz.

Figura 47. Tráfico voz rechazados con *UGS @ 96 Kbps* en la red *WiMAX*

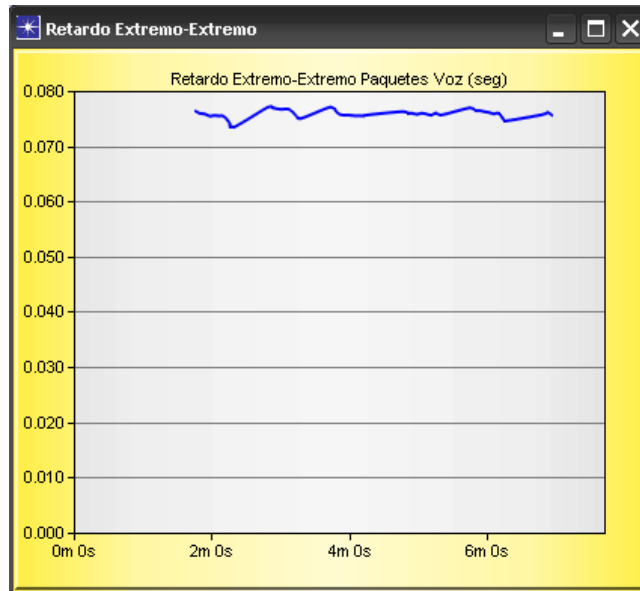


Fuente: Autores

De otra parte, en la figura 48 se puede observar que el retardo extremo-extremo de las llamadas disminuye notablemente en comparación con la figura 43 como consecuencia de los cambios realizados en los *MAC Service Class Definitions* del *WiMAX Config Node*.

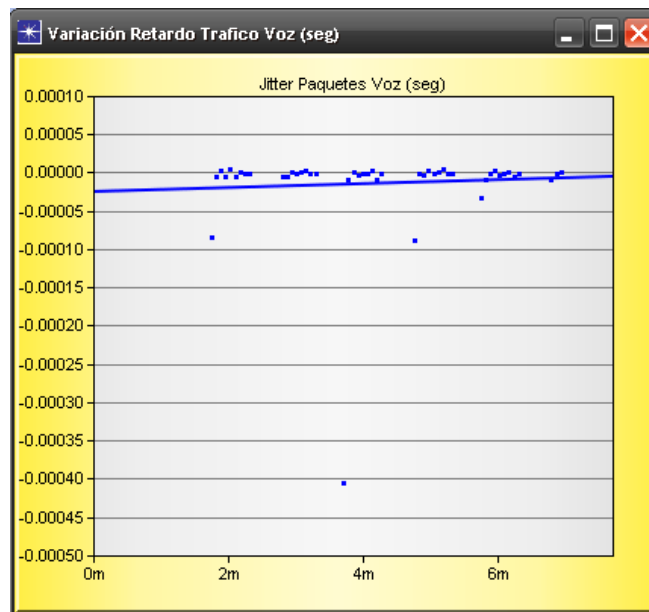
Su promedio es de aproximadamente 0.076 segundos, el cual es favorable para la transferencia de tráfico de voz ya que este valor de retardo extremo-extremo se encuentra dentro del retardo tolerable por la aplicación voz.

Figura 48. Retardo Paquetes de Voz Extremo-Extremo con *UGS* @ 96 Kbps en la red *WiMAX*



Fuente: Autores

Figura 49. Variación Retardo Paquetes de Voz con *UGS* @ 96 Kbps en la red *WiMAX*



Fuente: Autores

Como se observa en la figura 49, el *Jitter* ó variación del retardo bajo estas condiciones, es aproximadamente cero segundos.

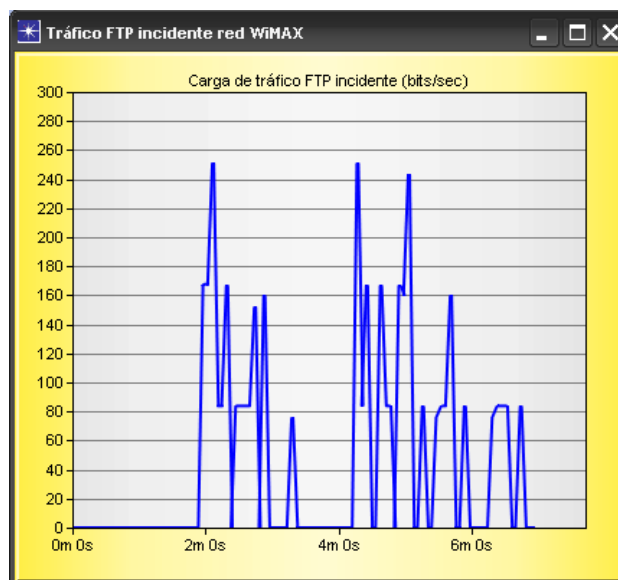
Si dos paquetes consecutivos salen del nodo origen con tiempos t_1 y t_2 y luego son reproducidos en el nodo destino con tiempos t_3 y t_4 , entonces: Un *jitter* negativo, indica que un paquete llegó al nodo destino con un tiempo de retardo menor al retardo promedio de los paquetes de un flujo de datos.

$$Jitter = (t_4 - t_3) - (t_2 - t_1) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Fuente: OPNET *Modeler* 14.0/14.5

En la figura 50 se puede observar la carga de tráfico *FTP* ofrecida (incidente) por uno de los nodos *SS* que pueden generar tráfico de las dos aplicaciones al mismo tiempo en la red *WiMAX*, en condiciones donde la aplicación voz tiene asignada un *Scheduling Type UGS*.

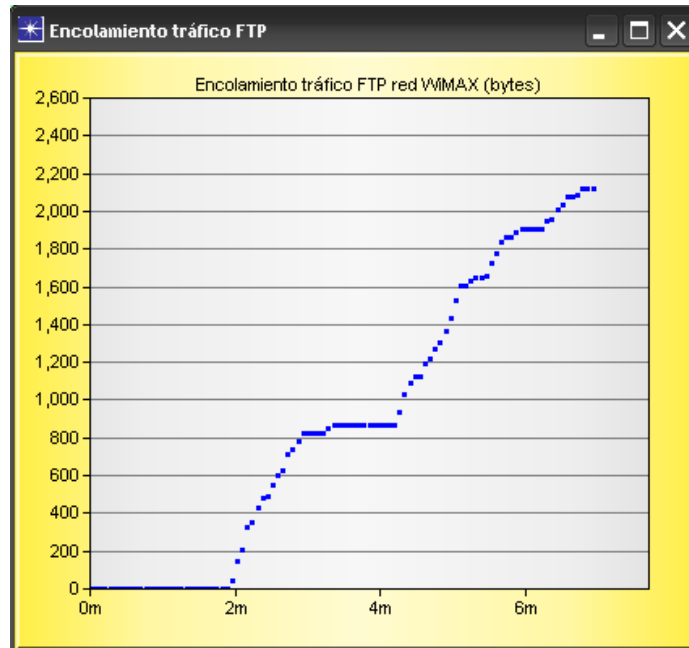
Figura 50. Trafico *FTP* incidente gradual en la red *WiMAX*



Fuente: Autores

En la figura 51 se puede observar que, debido a las modificaciones realizadas en el *MAC Service Class Definitions* en el *WIMAX Config Node*, el tráfico de transferencias vía *FTP* sufre un encolamiento progresivo.

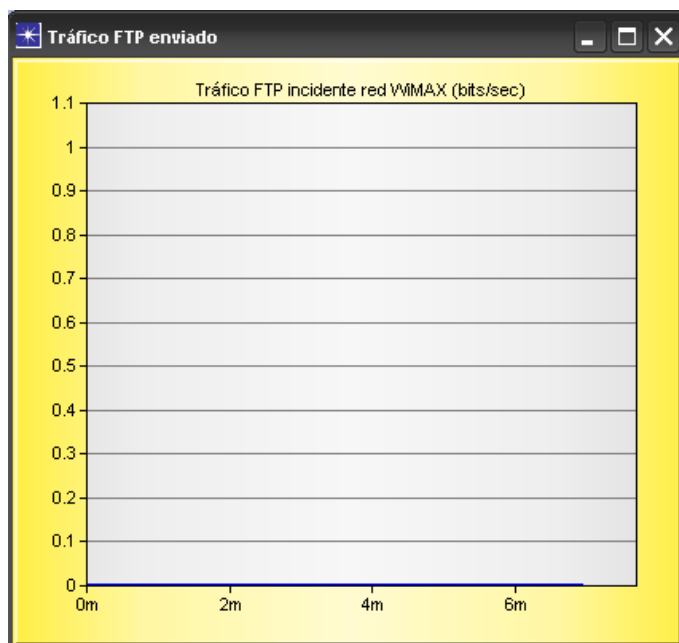
Figura 51. Encolamiento progresivo paquetes *FTP* en la red *WiMAX*



Fuente: Autores

En la figura 52 el tráfico *FTP* transmitido (incidente) por la red *WiMAX* es nulo, debido a que la conexión *UGS* consume todos los recursos del canal.

Figura 52. Tráfico *FTP* transmitido red *WiMAX*



Fuente: Autores

Ahora, se realizará una modificación a la regla de mapeo inicialmente formulada para esta simulación sin impactar en el rendimiento de la aplicación voz, para que el tráfico generado por la aplicación *FTP* sea efectivamente transmitido a través de la red *WiMAX*.

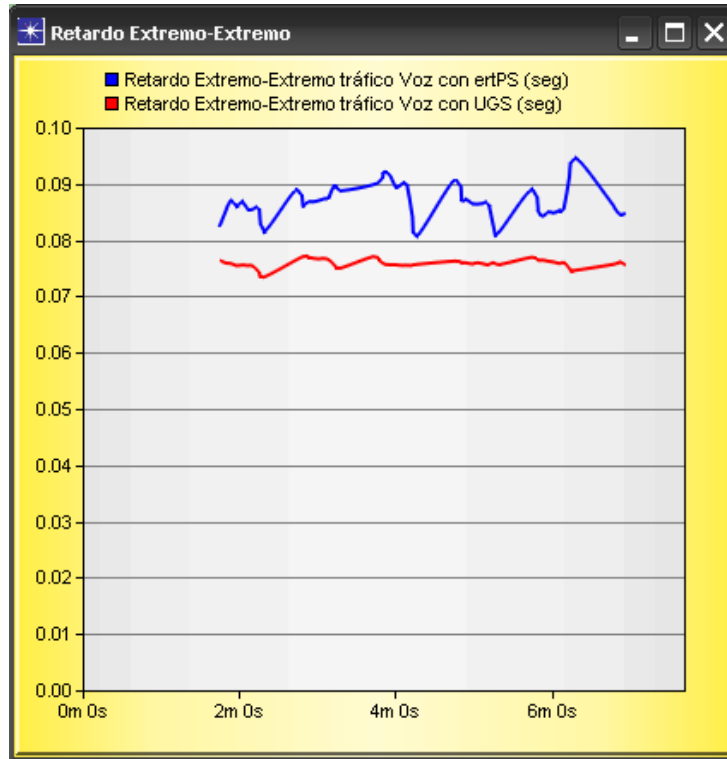
Tabla 18. Modificación mapeo implementado

Servicio	IP QoS	MAC QoS
Voz	<i>Interactive Voice (6)</i>	<i>ertPS</i>

Fuente: Autores

Se puede observar en la figura 53 que con este nuevo mapeo (línea azul) el retardo extremo-extremo del tráfico de voz, se incrementa un poco con respecto al *delay* de la figura 48 (línea roja), pero esto no genera un impacto adverso en el rendimiento de esta aplicación.

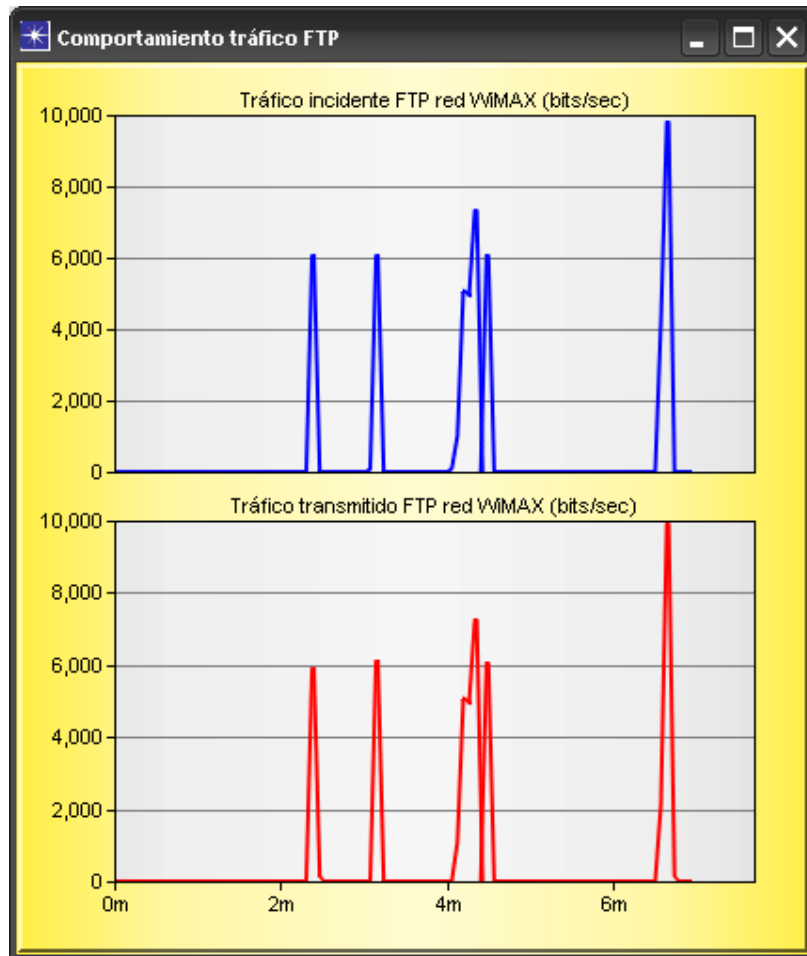
Figura 53. Retardo Paquetes de Voz Extremo-Extremo con *ertPS* @ 96 Kbps



Fuente: Autores

Aplicando un re-mapeo para mejorar el rendimiento de la aplicación *FTP*, efectivamente el tráfico generado por esta aplicación es transmitido sin problemas en la red *WiMAX*, aprovechando las características propias de *ertPS* como el nuevo *Scheduling Type* para voz, como se puede observar en la figura 54.

Figura 54. Comportamiento Tráfico *FTP* red *WiMAX*

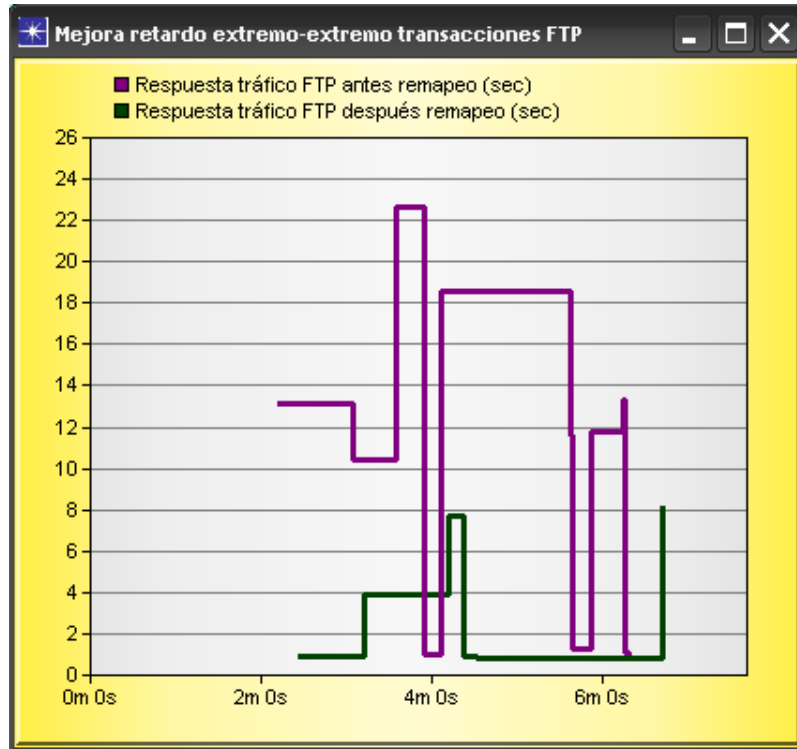


Fuente: Autores

Se puede observar en la figura 55 que el retardo del tráfico *FTP* disminuye notablemente cambiando el *Scheduling Type* sobre la aplicación voz en comparación con la relación multicapa anterior.

De esta manera, sin modificar parámetro alguno de *QoS* para *FTP*, y cambiando algunos para voz, se logra un equilibrio en la transferencia de datos de dos aplicaciones con diferentes parámetros de calidad de servicio sobre un mismo canal.

Figura 55. Disminución retardo extremo-extremo tráfico *FTP* red *WiMAX*



Fuente: Autores

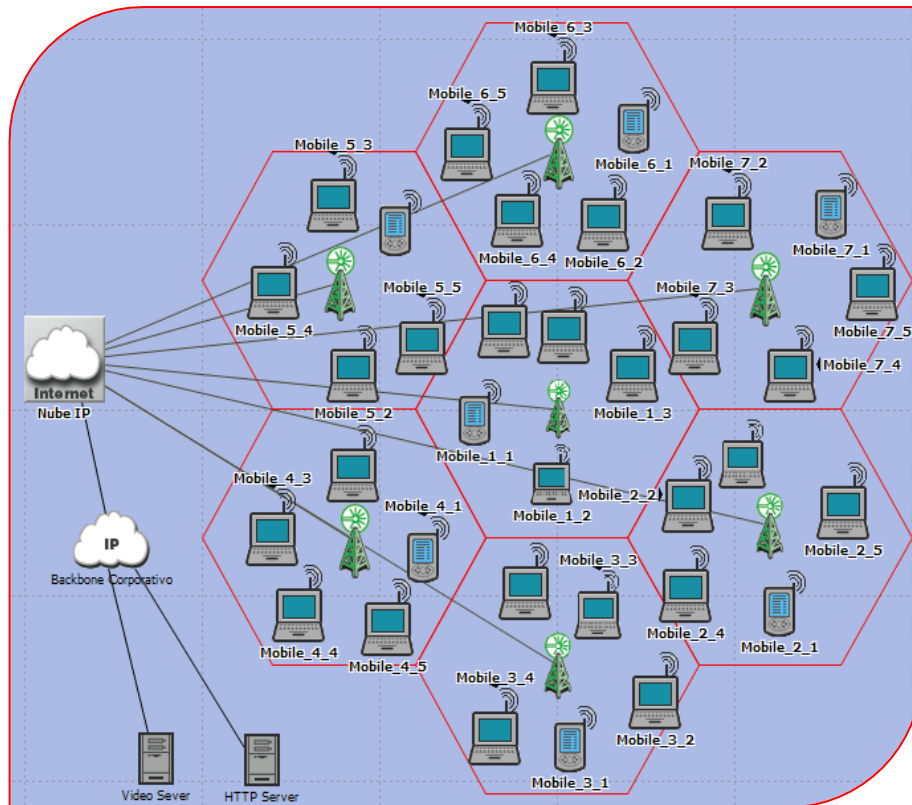
5.6.2 Qos Multicapa con Aplicaciones Voz y Tráfico *Web*

5.6.2.1 *Objetivo*

Analizar el comportamiento del tráfico de las aplicaciones voz (*PCM Quality Speech*), y tráfico *web* (*HTTP Heavy Browsing*) en una red *WiMAX* en configuración *PMP* (*Point to Multipoint*).

5.6.2.2 Descripción del Escenario

Figura 56. Descripción del escenario



Fuente: Autores

En este escenario (figura 56) se desplegará una red *WiMAX* conformada por 7 celdas con 5 nodos *SS* y 1 nodo *BS* en cada una. Se examinarán dos aplicaciones: voz y tráfico *web*, la primera con altos requerimientos de calidad de servicio y la segunda aplicación sin mayores requerimientos de parámetros de calidad para la transferencia de información.

El modo de operación utilizado es *PMP (Point-to-Multipoint)* soportado en el estándar *IEEE 802.16*.

Todos los nodos SS podrán realizar transferencias vía *web* pero sólo un nodo suscriptor en cada celda, podrá generar tráfico de voz.

Se hará un análisis usando la regla de mapeo para voz que se observa en la tabla 19.

Tabla 19. Mapeo implementado

Servicio	IP QoS	MAC QoS
Voz	<i>Interactive Voice (6)</i>	<i>ertPS</i>
Tráfico <i>HTTP</i>	<i>Best Effort (0)</i>	<i>Best Effort (0)</i>

Fuente: Autores

En este escenario esta regla de mapeo es asociada solo a la aplicación voz, por ser intolerante al retraso y al *jitter* entre otros parámetros de calidad de servicio. La aplicación *HTTP* está asociada un servicio tipo *Best Effort* en la capa *IP* y en la capa *MAC* está asociado a un *Scheduling Type Best Effort*, sin mayores requerimientos de calidad de servicio.

A continuación se describirán los parámetros de simulación:

Parámetros de funcionamiento, de acuerdo al perfil *PHY Wireless MAN SC P1*¹⁵:

- Ancho de banda: *25 MHz* (cada *MS*)
- Frecuencia de operación: *10 GHz*
- Multiplexación: *TDD (Time Division Duplexing)*.
- Modo de eficiencia implementado: *Efficiency Enabled*

¹⁵ *PHY Wireless MAN SC P1*: Perfil de la capa física de *WiMAX* que se asocia a todos los nodos de la red.

Parámetros técnicos del escenario:

- Potencia de la estación base: 5 W
- Potencia de los nodos SS: 0.5 W
- Modulación implementada: *Adaptive Modulation (QPSK $\frac{1}{2}$ y QPSK $\frac{3}{4}$)*
- Esquema de codificación: G.711
- Radio de las celdas: 500 metros
- *Pathloss Parameter: Pedestrian ("Outdoor to Indoor and Pedestrian Environment")*¹⁶
- *Pathloss Model: Free Space*
- *Terrain Type: Terrain Type A*¹⁷

A continuación se van a parametrizar las aplicaciones:

Para la aplicación voz, se establecerá la clase de servicio del *WiMAX Config Node* en *SILVER* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: ertPS*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 96000*
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 96000*
- *Maximum Latency(milliseconds) :10*

Para la aplicación *HTTP*, se establecerá la clase de servicio del *WiMAX Config Node* en *BRONZE* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: Best Effort*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 450000*
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 450000*

¹⁶ Descrito en "*Radio TX Technologies for IMT2000*" ponencia blanca de la ITU.

¹⁷ Corresponde a un terreno accidentado con densidad moderada de arboles.

5.6.2.3 Variables a Medir

- Los valores *Node Statistic* son tomadas en el nodo SS_1_1 del escenario actual.

Tabla 20. Estadísticas usadas en el escenario

VARIABLE	DESCRIPCION	TIPO ESTADISTICA
<i>Load (bits/sec)</i>	Tráfico incidente	<i>Node Statistic</i>
<i>Throughput (bits/sec)</i>	Tráfico transmitido	<i>Node Statistic</i>
<i>Delay End to End (sec)</i>	Retardo extremo-extremo	<i>Global Statistic</i>
<i>Jitter (sec)</i>	Variación retardo	<i>Global Statistic</i>
<i>Traffic dropped (bits/sec)</i>	Tráfico rechazado	<i>Global Statistic</i>
<i>Queue Size (bytes/sec)</i>	Encolamiento Tráfico	<i>Global Statistic</i>

Fuente: Autores

5.6.2.4 Metodología

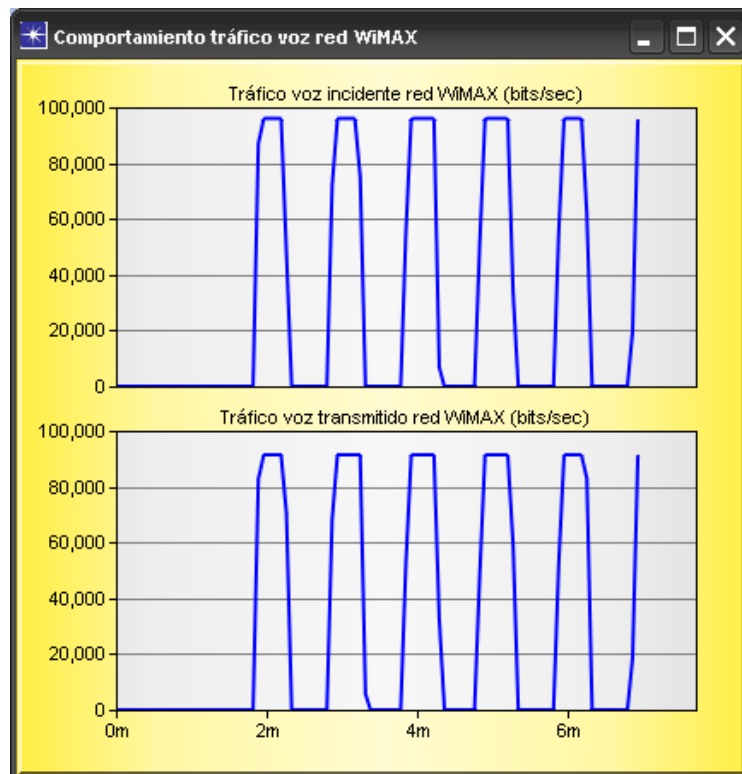
A continuación se describe la metodología utilizada en esta prueba:

1. Se ajusta los parámetros de QoS multicapa para obtener un buen rendimiento de la aplicación de voz y la aplicación *web* en una red *WIMAX*.
2. Se analizará el rendimiento del tráfico de las aplicaciones voz y *web* incidente en la red usando los parámetros especificados en la tabla 20.

5.6.2.5 Análisis de Resultados

En la figura 57, se puede observar que la carga (tráfico incidente) y el tráfico de voz transmitido por el nodo SS 1_1 tiene aproximadamente el mismo valor. Esto es debido a que la red WiMAX ha asignado los recursos necesarios a esta aplicación debido a la regla de mapeo que permite que se relacionen los parámetros de calidad de servicio para este tráfico. Cada paquete de voz tiene 640 *bits*, una llamada de voz genera 100 paquetes por segundo, para un total de 64000 *bps*¹⁸. A este tráfico se le agregan 160 *bits* de cabecera en la capa *IP* y *TCP* respectivamente.

Figura 57. Comportamiento tráfico voz nodo SS_1_1

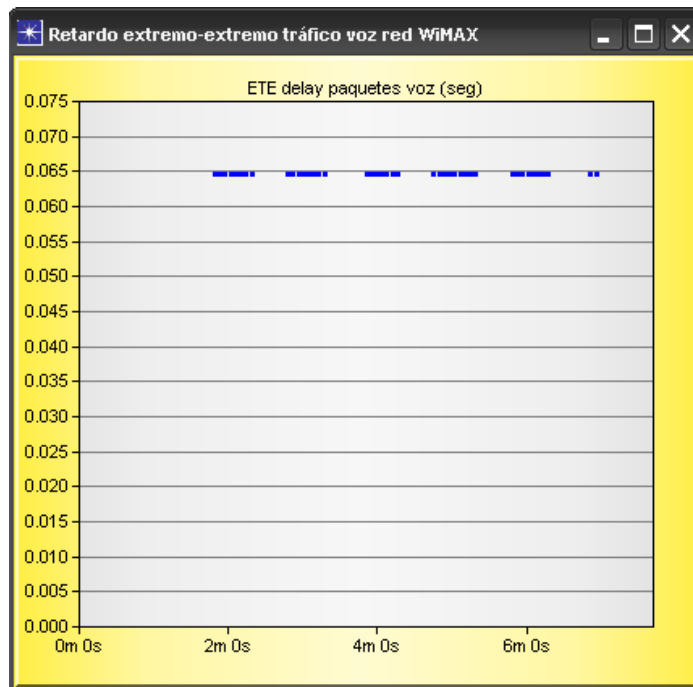


Fuente: Autores

¹⁸ Basado en: *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies. Opnetwork 2008.

En la figura 58, se puede observar el retardo extremo-extremo (*End to End*) de los paquetes del tráfico de voz en la red *WiMAX*. Este valor es de 0.065 segundos, un retardo mínimo [8] que ofrece condiciones optimas en el canal de transmisión para que la aplicación voz tenga buen un rendimiento.

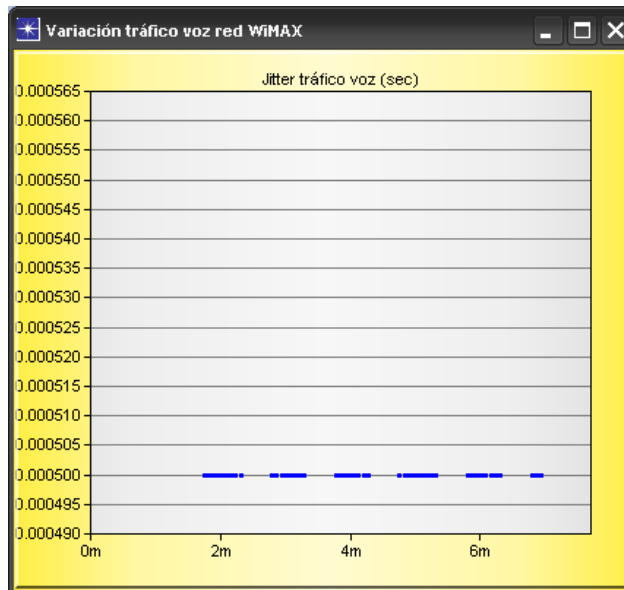
Figura 58. Retardo extremo-extremo tráfico red *WiMAX*



Fuente: Autores

En la figura 59, se puede observar la variación del retardo (*jitter*) del tráfico de la aplicación voz en la red *WiMAX*. Este *jitter* es de 0.0005 segundos, ofreciendo un óptimo rendimiento [35] en los paquetes de voz que atraviesan la red, evitando que la calidad de esta aplicación se vea afectada.

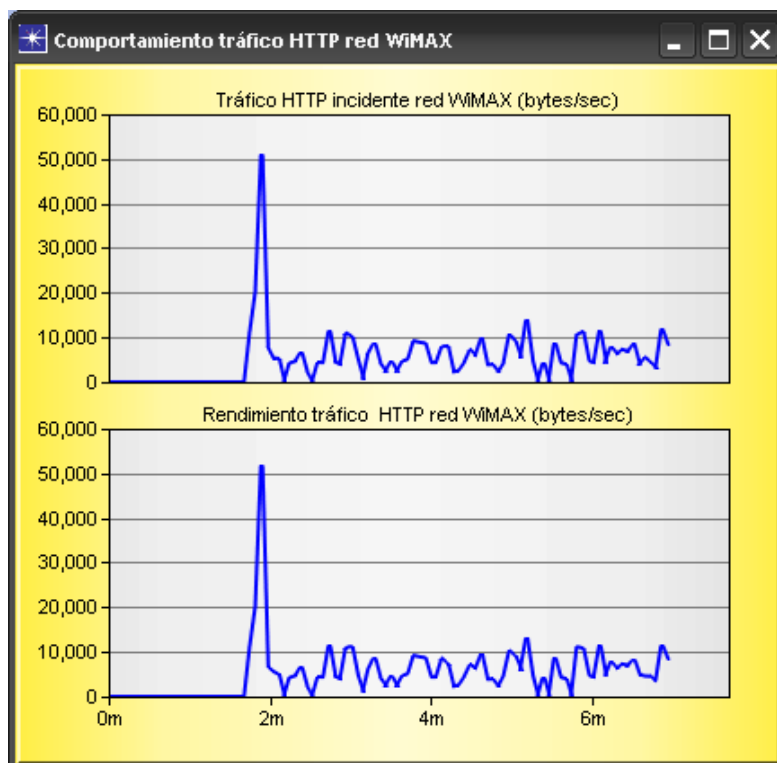
Figura 59. Variación retardo tráfico voz red *WiMAX*



Fuente: Autores

En la figura 60, se puede observar el comportamiento del tráfico *HTTP* generado por los nodos *SS* de la red *WiMAX*. Este valor se mide en *bytes/sec* enviados (direccionados) por las aplicaciones tipo *HTTP* hacia la capa de transporte en la red. El ancho de banda del tráfico *web* incidente es el mismo que el ancho de banda del tráfico transmitido. Esto es posible, porque la aplicación voz, no consume los recursos del canal de transmisión usados por las aplicaciones tipo *HTTP* ya que mediante una buena regla de mapeo se relacionan correctamente los parámetros de calidad de servicio multicapa en una red *WiMAX* a las aplicaciones de modo que estas sólo consumen los recursos asignados por este mapeo a cada una de ellas. El tráfico *web* máximo es de aproximadamente 52000 *bytes/sec*. Su comportamiento irregular es debido a que el tamaño de los objetos (componentes páginas *web*) no siempre es el mismo.

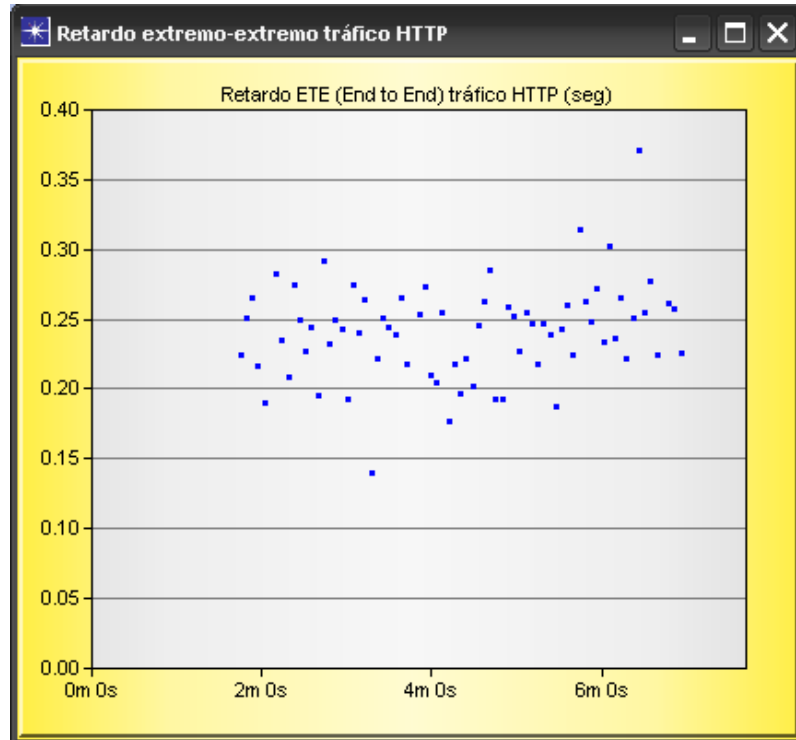
Figura 60. Comportamiento tráfico *HTTP* red *WiMAX*



Fuente: Autores

En la figura 61, se puede observar que el retardo extremo-extremo de las aplicaciones tipo *HTTP* toma un promedio de 0.25 segundos en atravesar la red *WiMAX*. Esto es un retardo óptimo [36] para una aplicación tipo *Best Effort*, sin mayores requerimientos de calidad de servicio para su transferencia de datos.

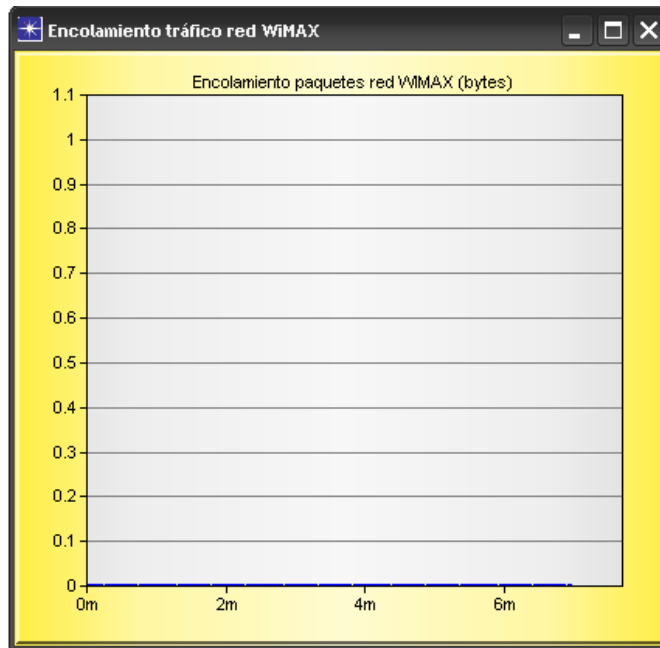
Figura 61. Retardo extremo-extremo tráfico *HTTP* red *WiMAX*



Fuente: Autores

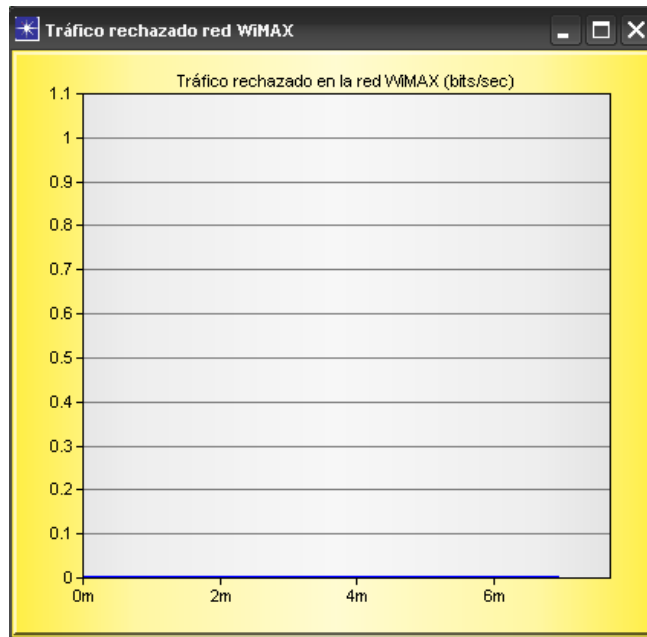
El encolamiento (figura 62) y rechazo de tráfico (figura 63) de las aplicaciones en la red *WiMAX* es nulo. Esto es debido a las características asociadas al correcto mapeo multicapa, de esta manera se evita que se pierdan paquetes de las dos aplicaciones.

Figura 62. Encolamiento tráfico red WiMAX



Fuente: Autores

Figura 63. Tráfico rechazado red WiMAX



Fuente: Autores

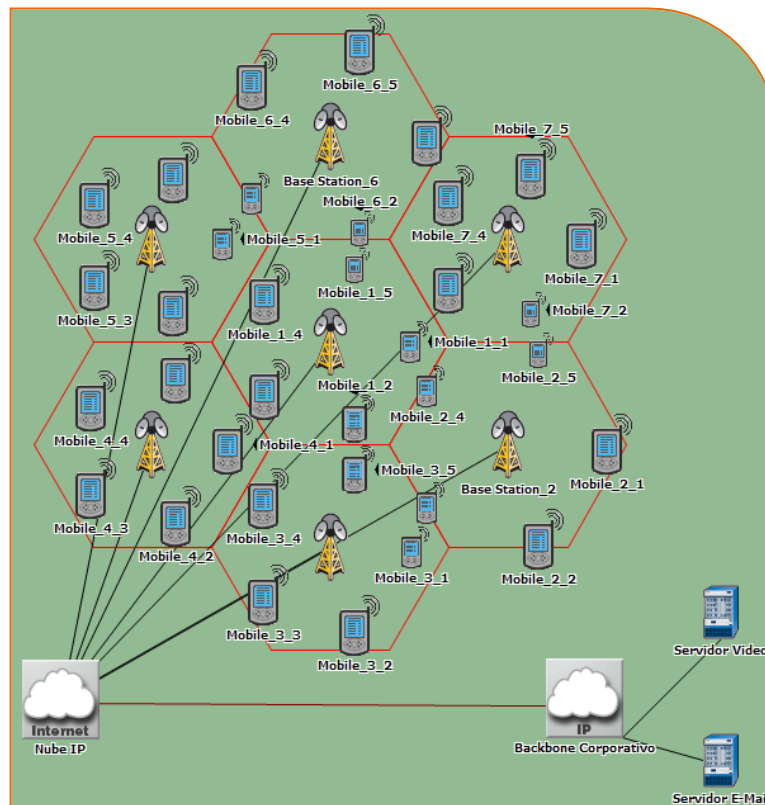
5.6.3 Qos Multicapa con Aplicaciones Video y Correo Electrónico

5.6.3.1 Objetivo

Analizar requerimientos de calidad de servicio multicapa en una red *WiMAX* con configuración *PMP* con aplicaciones video y correo electrónico.

5.6.3.2 Descripción del Escenario

Figura 64. Descripción Escenario



Fuente: Autores

Este escenario (figura 64) se compone de 7 celdas, cada celda con 5 nodos estáticos. Solo 1 de cada 5 nodos de la red podrán transmitir video y correo electrónico en la red *WiMAX*. A cada nodo de estos se le asignó un ancho de banda de 1 *Mbps* para la transferencia. Los restantes nodos de la red, pueden transmitir correo electrónico. El ancho de banda máximo asociado por nodo a la aplicación de correo electrónico es de 12000 *bps*.

Se mostrará la ventaja de implementar una solución de calidad de servicio multicapa en una red *WiMAX*, en situaciones donde el canal de transmisión es compartido por estas dos aplicaciones.

El retardo extremo-extremo del tráfico de las aplicaciones *Best Effort* en las redes de interconectividad hoy en día, es elevado. Cuando un canal de comunicaciones es compartido por aplicaciones elásticas e inelásticas, las segundas consumen más recursos del canal y afectan considerablemente el rendimiento de las aplicaciones elásticas.

El modo de operación utilizado es *PMP (Point- to- Multipoint)* soportado en el estándar *IEEE 802.16*.

Se hará el análisis usando la siguiente regla de mapeo para video:

Tabla 21. Mapeo implementado

Servicio	IP QoS	MAC QoS
Video	<i>Streaming Multimedia (4)</i>	<i>rtPS</i>
Correo Electrónico	<i>Best Effort (0)</i>	<i>Best Effort (0)</i>

Fuente: Autores

Cada aplicación posee diferentes parámetros de calidad de servicio, pero solo la aplicación video será relacionada con la regla de mapeo por requerir unos fuertes parámetros de calidad de servicio, mientras que el rendimiento de la aplicación de correo electrónico por tener características *Best Effort*, será medida de acuerdo a las políticas de calidad de servicio ofrecidas por la regla de mapeo.

En una red *WiMAX* la aplicación video solo es asociada a un *Scheduling Type nrtPS*, con lo cual no es posible realizar un remapeo de sus parámetros de calidad de servicio.

A continuación se describirán los parámetros de simulación:

Parámetros de funcionamiento, de acuerdo al perfil *PHY Wireless MAN SC P1*¹⁹:

- Ancho de banda: *25 Mhz (cada MS)*
- Frecuencia de operación: *10 GHz*
- Multiplexación: *TDD (Time Division Duplexing)*.
- Modo de eficiencia implementado: *Physical Layer Enabled*

Parámetros técnicos del escenario:

- Potencia de la estación base: *5 W*
- Potencia de los nodos SS: *0.5 W*
- Modulación implementada: *Adaptive Modulation (QPSK ½ y QPSK ¾)*
- Radio de las celdas: *1000 metros*
- *Multipath Channel Model: ITU Pedestrian A*²⁰

¹⁹ *PHY Wireless MAN SC P1*: Perfil de la capa física de *WiMAX* que se asocia a todos los nodos de la red.

²⁰ El modo *ITU Pedestrian A* es usado en simulaciones para estudiar el efecto la baja diversidad de multi-trayectorias de la señal en entornos de movilidad a pie.

- *Pathloss Parameters: Pedestrian ("Outdoor to Indoor and Pedestrian Environment")*²¹
- *Terrain Type: Terrain Type A*²²
- *Formato de video: VCR Quality Video*²³
- *Frame Interarrival Time Information: 30 frames/sec*
- *Frame Size Information (bytes): 352X240 pixels*

A continuación se van a parametrizar las aplicaciones:

Para la aplicación video, se modificará el *Service Class* del *WiMAX Config Node: GOLD* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: rtPS*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 1000000*²⁴
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 1000000*
- *Maximum Latency(milliseconds) :15*

Para la aplicación correo electrónico, se modificará el *Service Class* del *WiMAX Config Node: BRONZE* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: Best Effort*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 12000*²⁵
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 12000*

²¹ Descrito en "Radio TX Technologies for IMT2000" ponencia blanca de la ITU.

²² Corresponde a un terreno accidentado con densidad moderada de arboles.

²³ Fuente: OPNET Modeler 14.0/14.5

²⁴ Will Hrudey y Ljiljana Trajković. *Streaming Video Content Over WiMAX Broadband Access*. Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia. Opnetwork. 2008.

²⁵ Fuente: OPNET Modeler 14.0/14.5

5.6.3.3 Variables a Medir

Las estadísticas que se utilizarán para la simulación son las siguientes:

- Los valores *Node Statistic* son tomadas en el nodo SS 5_1 del escenario actual.

Tabla 22. Estadísticas usadas en el escenario

VARIABLE	DESCRIPCION	TIPO ESTADISTICA
<i>Load (bits/sec)</i>	Tráfico incidente	<i>Global/Node Statistic</i>
<i>Throughput (bits/sec)</i>	Tráfico transmitido	<i>Global/Node Statistic</i>
<i>Delay End to End (sec)</i>	Retardo extremo-extremo	<i>Global Statistic</i>
<i>Jitter (sec)</i>	Variación retardo	<i>Global Statistic</i>
<i>Traffic dropped (bits/sec)</i>	Tráfico rechazado	<i>Global Statistic</i>
<i>Queue Size (bytes/sec)</i>	Encolamiento Tráfico	<i>Global Statistic</i>

Fuente: Autores

5.6.3.4 Metodología

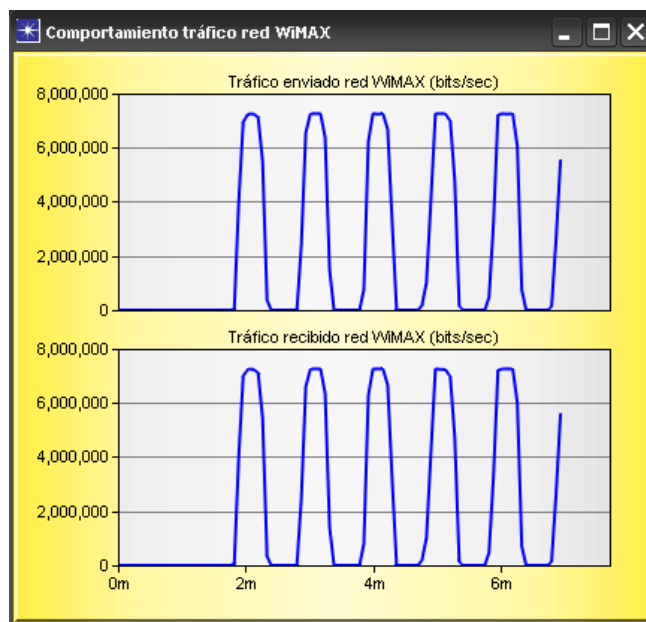
A continuación se describe la metodología utilizada en esta prueba:

1. Se analizará el rendimiento en el tráfico de video y correo electrónico incidente en la red mediante la regla de mapeo mostrada en la tabla 21.
2. Se ajusta los parámetros de QoS multicapa para obtener un rendimiento de las aplicaciones video y correo electrónico.

5.6.3.5 Análisis de Resultados

En la figura 65 se muestra el tráfico total de video sobre la red *WiMAX*. Son aproximadamente 7 Mbps. Efectivamente el rendimiento de la red, es óptimo, ya que el volumen de tráfico incidente es el mismo volumen de tráfico transportado y finalmente entregado en el receptor.

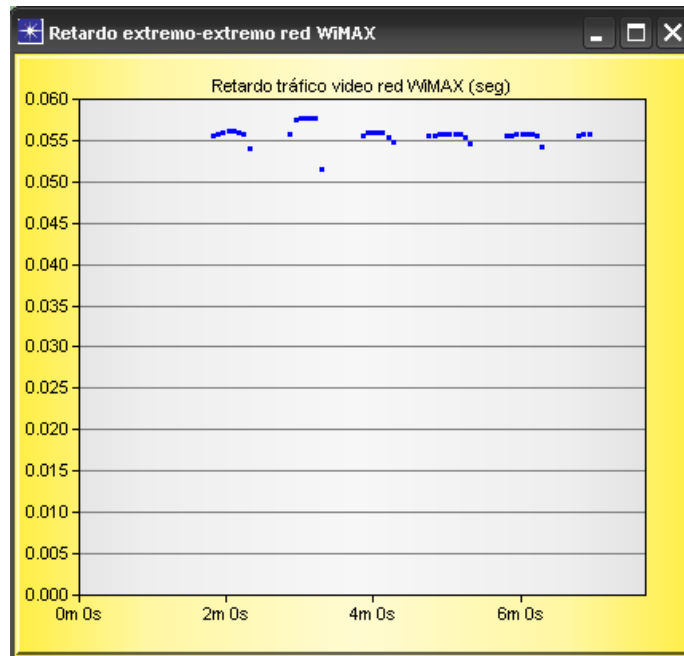
Figura 65. Rendimiento tráfico video red *WiMAX*



Fuente: Autores

En figura 66 se muestra el retardo extremo-extremo del tráfico de video. Este retardo es de aproximadamente 0.055 segundos, lo que quiere decir que se cuenta con un retardo mínimo en la red *WiMAX* para la entrega de los paquetes de video [37]. Para que el valor en tiempo de este retardo sea mínimo se debe configurar en la red *WiMAX* una relación multicapa de calidad de servicio, donde sea garantizado el correcto rendimiento de las aplicaciones de red.

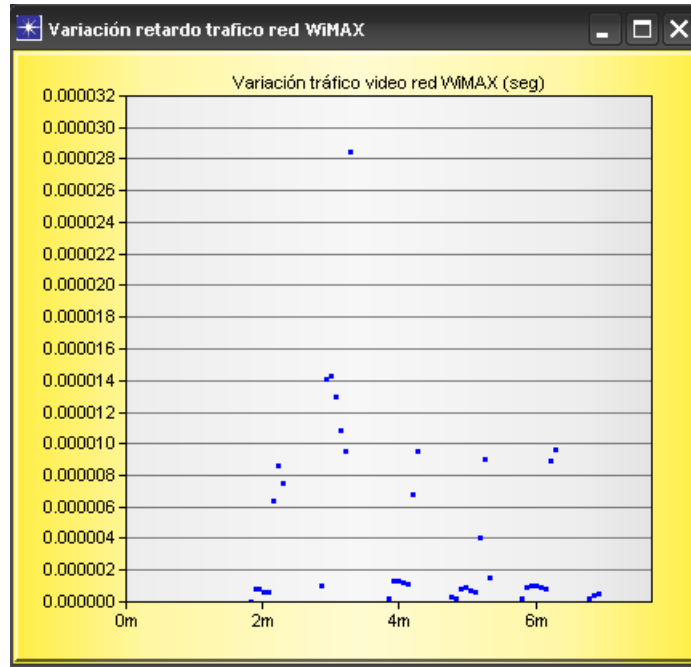
Figura 66. Retardo *ETE (End To End)* tráfico video en la red *WiMAX*



Fuente: Autores

La figura 67, muestra el *Jitter* ó variación del retardo del tráfico de video. Este valor es de aproximadamente 0.00004 segundos. Esta variación es un valor muy pequeño, lo que incide en una reproducción constante y sin interrupciones en el video.[25]

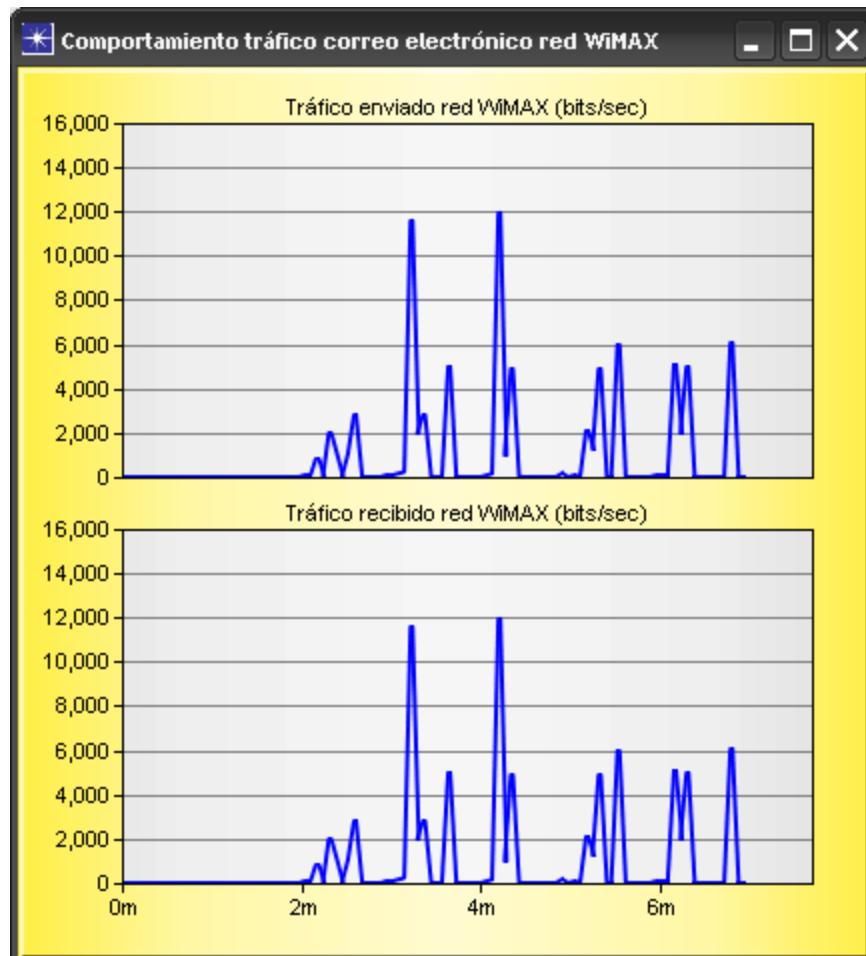
Figura 67. *Jitter* tráfico de video red WiMAX



Fuente: Autores

En la figura 68, se observa el comportamiento del tráfico de correo electrónico sobre la red *WiMAX*. El tráfico incidente en la red, es el mismo tráfico transmitido, lo que significa un rendimiento óptimo para esta aplicación. Lo anterior se logra porque al relacionar individualmente los parámetros de calidad de servicio multicapa en la aplicación video, esta solo consume los recursos del canal asignados a ella sin afectar el rendimiento de la aplicación correo electrónico.

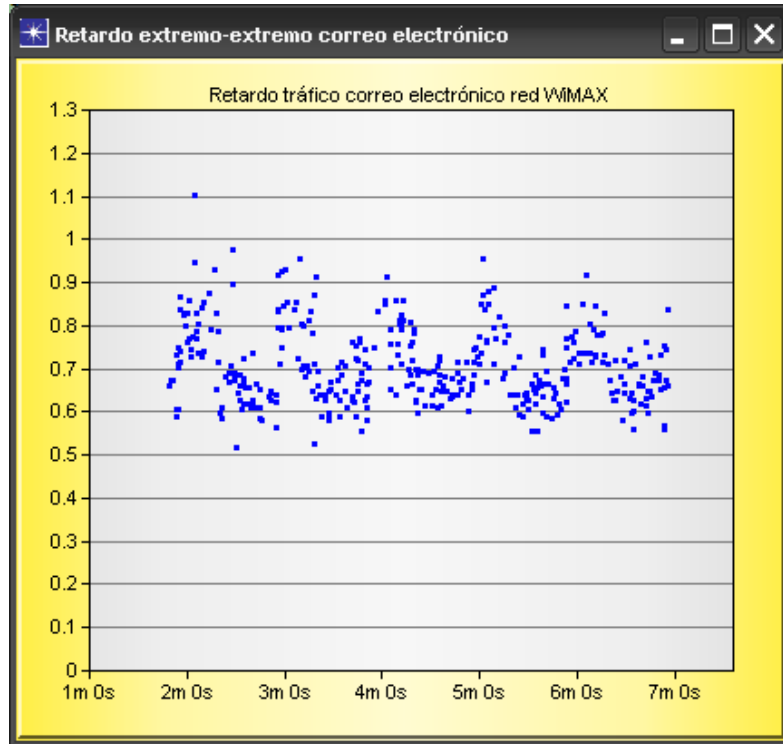
Figura 68. Comportamiento tráfico correo electrónico red WiMAX en el nodo SS_5_1



Fuente: Autores

En la figura 69 se puede observar el tiempo del retardo extremo-extremo del tráfico de correo electrónico con un promedio 0.9 segundos aproximadamente en atravesar la red WiMAX. Este valor en el retardo es mínimo para esta aplicación dándole a esta aplicación un buen rendimiento, dado que el correo electrónico es una aplicación elástica, lo que quiere decir que es tolerante a los retrasos en la red.

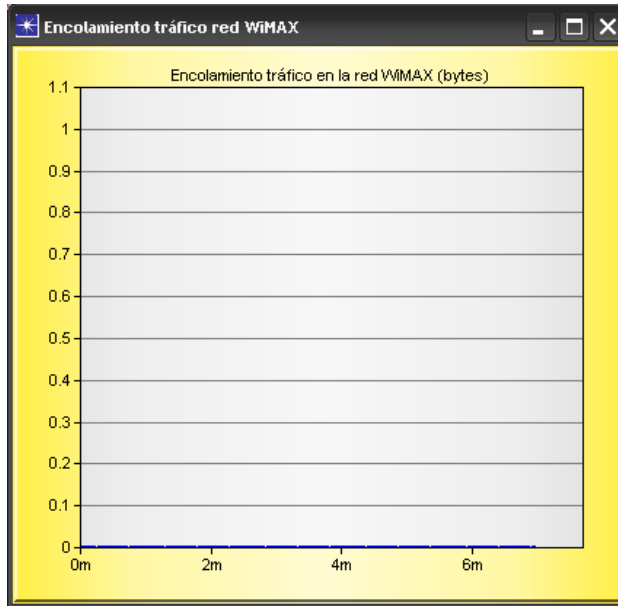
Figura 69. Retardo extremo-extremo tráfico correo electrónico red *WiMAX*



Fuente: Autores

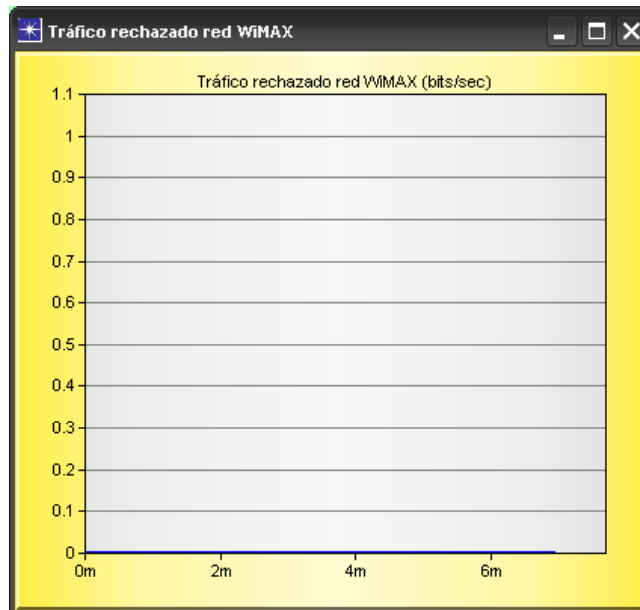
En las figuras 70 y 71 el tráfico rechazado y el encolamiento de paquetes en la red *WiMAX* son nulos, esto es debido a las políticas calidad de servicio establecida por la regla de mapeo. De este modo se evita que el rendimiento de las aplicaciones se vea afectado, sin importar si el canal de transmisión es compartido por tráfico generado por aplicaciones elásticas e inelásticas.

Figura 70. Encolamiento paquetes red WiMAX



Fuente: Autores

Figura 71. Tráfico rechazado en la red WiMAX



Fuente: Autores

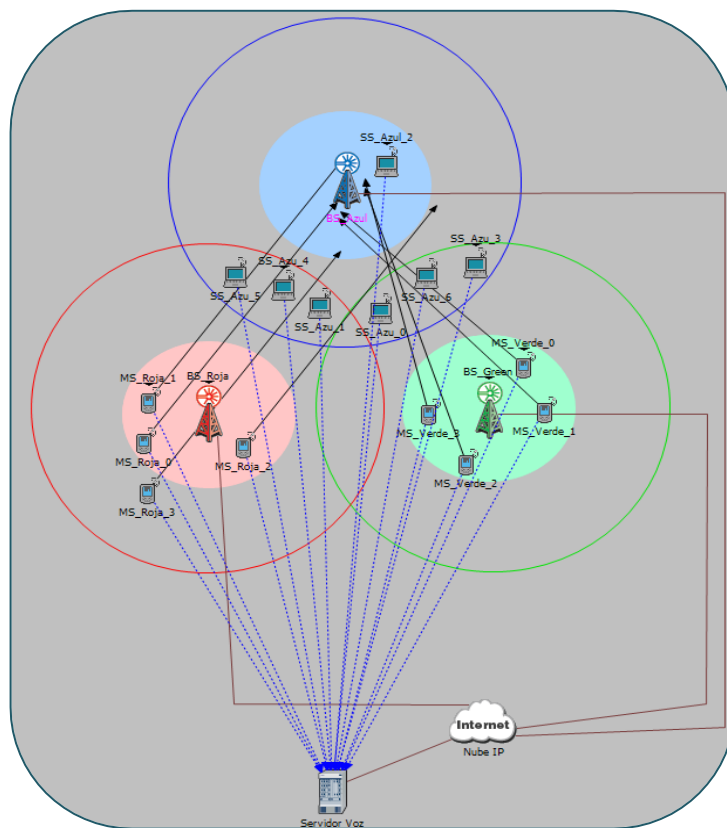
5.6.4 Movilidad con *Handoff* Forzado²⁶

5.6.4.1 *Objetivo*

Analizar los requerimientos de calidad de servicio multicapa en una red *WiMAX* con aplicación voz en un escenario de movilidad con *Handoff* iniciado por las estaciones base y su impacto en la continuidad de servicio.

5.6.4.2 *Descripción del escenario*

Figura 72. Escenario Movilidad con *Handoff* forzado



Fuente: Autores

²⁶ Basado en *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies 2007.

En este escenario (figura 72) se desplegará una red *WiMAX* con movilidad, donde la aplicación a analizar será voz con calidad *PCM Quality Speech* sin supresión de silencio (es un esquema de voz asociado al esquema de codificación G.711 con altos requerimientos de QoS), y se mostrará una desventaja que poseen las redes *WiMAX* actuales al momento de ofrecer continuidad de servicio en situaciones de saturación de tráfico en las celdas de la red. La saturación de tráfico ocurre cuando en una celda existen más nodos tipo *MS* ó *SS* de los que la estación base puede soportar, consumiendo todo el ancho de banda disponible en la celda, resultando en una posible interrupción en los servicios ofrecidos por la red *WiMAX* en esta celda.

El escenario (figura 72) está conformado de la siguiente manera:

- Celda Azul con 7 nodos *Suscriber Station*, denominados *SS_Azul_0*, *SS_Azul_1*, *SS_Azul_2*, *SS_Azul_3*, *SS_Azul_4*, *SS_Azul_5* y *SS_Azul_6*.
- Celda Roja con 4 nodos *Suscriber Station*, denominados *MS_Roja_0*, *MS_Roja_1*, *MS_Roja_2* y *MS_Roja_3*.
- Celda Verde con 4 nodos *Suscriber Station*, denominados *MS_Verde_0*, *MS_Verde_1*, *MS_Verde_2* y *MS_Verde_3*.²⁷

Los nodos de la celda Azul son estáticos, y los nodos de las celdas Verde y Roja son móviles. Para obtener la saturación de los recursos de la celda Azul, se hizo que los usuarios móviles se desplazaran hacia esta celda realizando el *Handoff* entre los 110 segundos y los 120 segundos de simulación. Todos los nodos *MS* y *SS* de la red generan tráfico de voz.

El modo de operación utilizado es *PMP (Point- to- Multipoint)*, soportado en el estándar *IEEE 802.16*.

²⁷ *SS: Suscriber Station* (se asocia a *MS* en entornos móviles)

En una red *WiMAX* el *Handoff* es un procedimiento comúnmente iniciado por los nodos *SS*, pero en circunstancias especiales, este, puede ser iniciado por las estaciones base.

Este escenario demuestra la ventaja que tiene una red *WiMAX* cuando implementa un sistema de *Handoff* forzado por parte de las estaciones base, ya que este sistema provee una continuidad en el servicio de las aplicaciones de red en situaciones cuando los recursos de las estaciones base se vean agotados por el número excesivo de nodos *SS* presente en las celdas.

Los pasos para realizar el proceso de *Handoff* forzado sobre un nodo *SS* son:

- Determinar la potencia de la señal con respecto a la estación base actual y su estación base más cercana.
- Determinar si hay recursos disponibles en la estación base más cercana para que pueda proveer un servicio a la estación *SS*.
- Solicitar *Handoff* a la nueva estación base.
- Ejecutar el cambio de estación base.

En redes móviles cuando se ofrece el servicio de voz en tiempo real, es importante reducir el tiempo de *Handoff* al mínimo posible para disminuir la interrupción en la llegada de los paquetes al dispositivo móvil debido al cambio en el camino de la comunicación.

Inicialmente se hará un análisis usando la regla de mapeo para voz de la tabla 23.

Tabla 23. Mapeo implementado

IP QoS	MAC QoS
<i>Interactive Voice (6)</i>	<i>UGS</i>

Fuente: Autores

Todos los nodos de este escenario ejecutarán llamadas de voz con calidad *PCM Quality Speech* sin supresión de silencio, con un ancho de banda de aproximadamente 64000 *bps*. Cada paquete de voz tiene 640 *bits*, una llamada de voz genera 100 paquetes por segundo, para un total de 64000 *bps*²⁸.

A continuación se describirán los parámetros de simulación:

Parámetros de funcionamiento, de acuerdo al perfil *Wireless MAN SC P1*²⁹:

- Ancho de banda: 25 *MHz* (cada *MS*)
- Frecuencia de operación: 10 *GHz*
- Multiplexación: *TDD (Time Division Duplexing)*.
- Modo de eficiencia implementado: *Mobility and Ranging Enabled*

Parámetros técnicos del escenario:

- Potencia de la estación base: 7 *W*
- Potencia de los nodos *SS*: 0.5 *W*
- Modulación implementada: *Adaptive Modulation (QPSK ½ y QPSK ¾)*
- Esquema de codificación: G.711
- Radio de las celdas: 1000 metros
- *Multipath Fading Model: ITU Vehicular A*³⁰

²⁸ Basado en: *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies. Opnetwork 2008.

²⁹ *PHY Wireless MAN SC P1*: Perfil de la capa física de *WiMAX* que se asocia a todos los nodos de la red.

³⁰ *ITU Vehicular A* es más eficiente y tolerante que *ITU Pedestrian A* al fenómeno *Multipath* en entornos móviles.

- *Pathloss Parameter: Vehicular Environment*³¹
- *Pathloss Model: Free Space*
- *Terrain Type: Terrain Type A*³²

A continuación se va a parametrizar la aplicación:

Para la aplicación voz, se modificará la clase de servicio *GOLD* de *WiMAX* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: UGS*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 64000*³³
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 64000*
- *Maximum Latency(milliseconds) :10*

5.6.4.3 Variables a medir

Las estadísticas que se utilizarán para la simulación están relacionadas en la tabla 24:

- Los valores *Node Statistic* son tomadas en los nodos *SS* y *MS* del escenario actual.
- La variable *BS Free Capacity* se mide en *Mbps (Mega symbols per second)*.

³¹ Entorno de movilidad vehicular.

³² Corresponde a un terreno accidentado con densidad moderada de árboles.

³³ Fuente *OPNET Modeler 14.0/14.5*

Tabla 24. Estadísticas usadas en el escenario

VARIABLE	DESCRIPCION	TIPO ESTADISTICA
<i>Load (bits/sec)</i>	Tráfico incidente	<i>Global/Node Statistic</i>
<i>Delay End to End (sec)</i>	Retardo extremo-extremo	<i>Global Statistic</i>
<i>Jitter (sec)</i>	Variación retardo	<i>Global Statistic</i>
<i>BS free Capacity (Mpsps)</i>	Capacidad estación base	<i>Node Statistic</i>
<i>Serving BS ID</i>	Identificador estación base	<i>Node Statistic</i>

Fuente: Autores

5.6.4.4 Metodología

A continuación se describe la metodología utilizada en esta prueba:

1. Se analizará el rendimiento en el tráfico de voz incidente en la red en entorno de movilidad sin *Handoff* forzado.
2. Se analizará el rendimiento en el tráfico de voz incidente en la red en entorno de movilidad con *Handoff* forzado.
3. Luego, se comparan los resultados obtenidos.

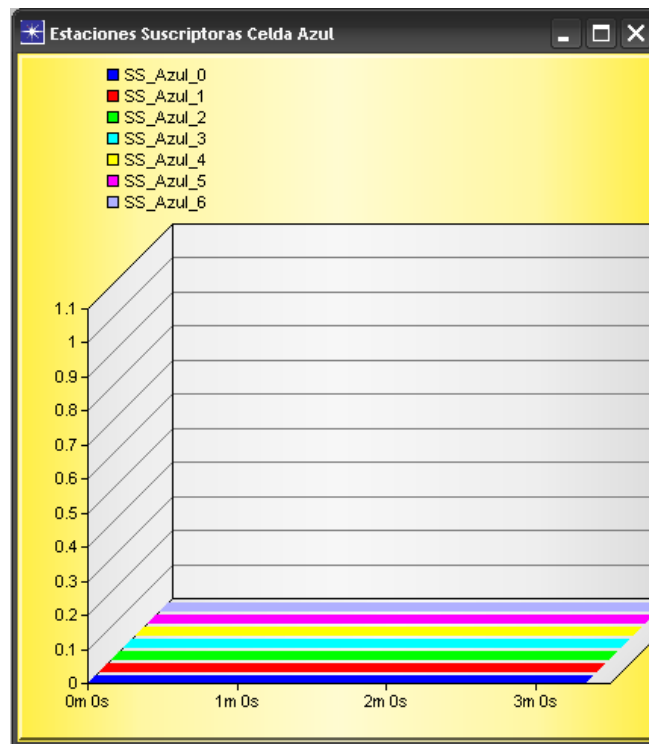
5.6.4.5 Análisis de resultados

- **Primera parte: Movilidad sin *Handoff* forzado en la red *WiMAX***

En esta parte de la simulación se analizará el comportamiento del tráfico de voz, con movilidad en una red *WiMAX* sin *Handoff* forzado y su impacto en la continuidad del servicio y en el rendimiento de la aplicación.

En la figura 73 se puede observar que durante la simulación, antes de implementar el *Handoff* forzado, los nodos de la celda azul, permanecen con el mismo *BS ID* (eje Y de la grafica 73) de la estación base.

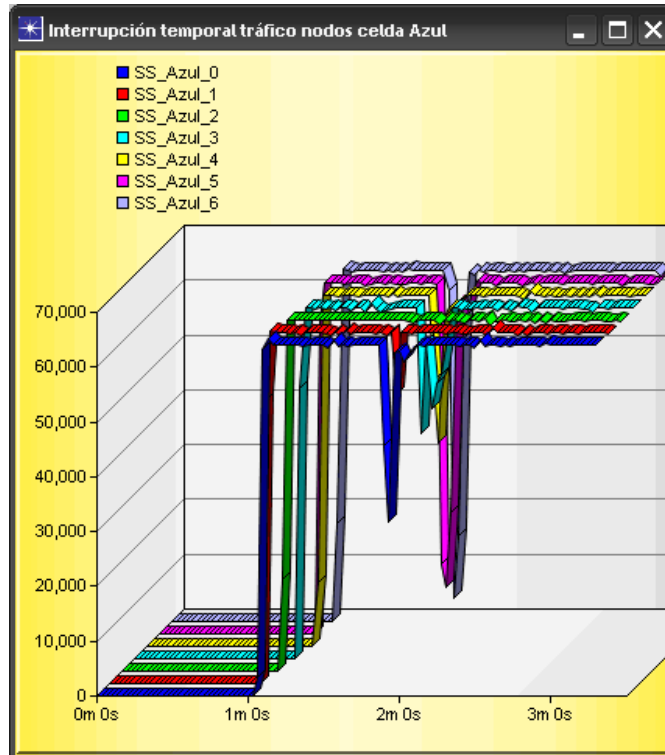
Figura 73. *BS ID* nodos SS celda azul antes *Handoff* forzado



Fuente: Autores

En la gráfica 74 se puede ver como el tráfico de algunos nodos de la celda azul (SS_Azul_0, SS_Azul_1, SS_Azul_3, SS_Azul_4, SS_Azul_5 y SS_Azul_6) se ve reducido (ver pico de caída en el tráfico de las aplicaciones), temporalmente debido a sus ubicaciones en los límites de su celda (celda azul) en el momento cuando los nodos de las celdas verde y roja realizan el proceso de *Handoff* hacia esta. El nodo SS_Azul_2 posee una buena relación señal a ruido con respecto a su estación base debido a su cercanía a esta, por consiguiente el tráfico generado por este nodo no se ve afectado.

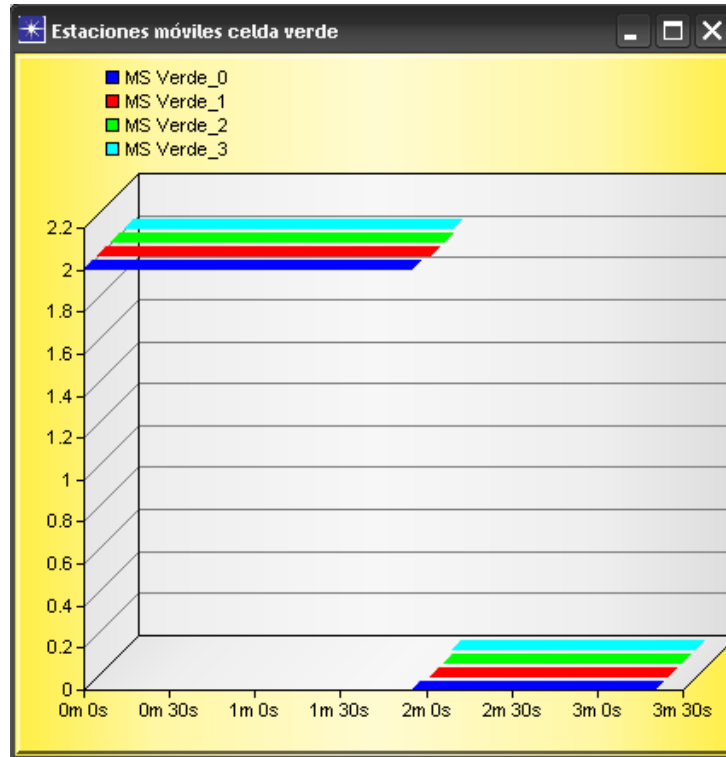
Figura 74. Comportamiento tráfico nodos celda azul antes *Handoff* forzado (*bps*)



Fuente: Autores

En la figura 75, se puede observar que las estaciones *MS* de la celda verde, cambian su *BS ID* ya que se desplazan de manera progresiva hacia la celda azul. El cambio del *BS ID* ocurre a los 110 segundos de simulación, pasando del *BS ID* 2 de su estación base inicial (estación base verde) al *BS ID* 0 perteneciente a la estación base de la celda azul.

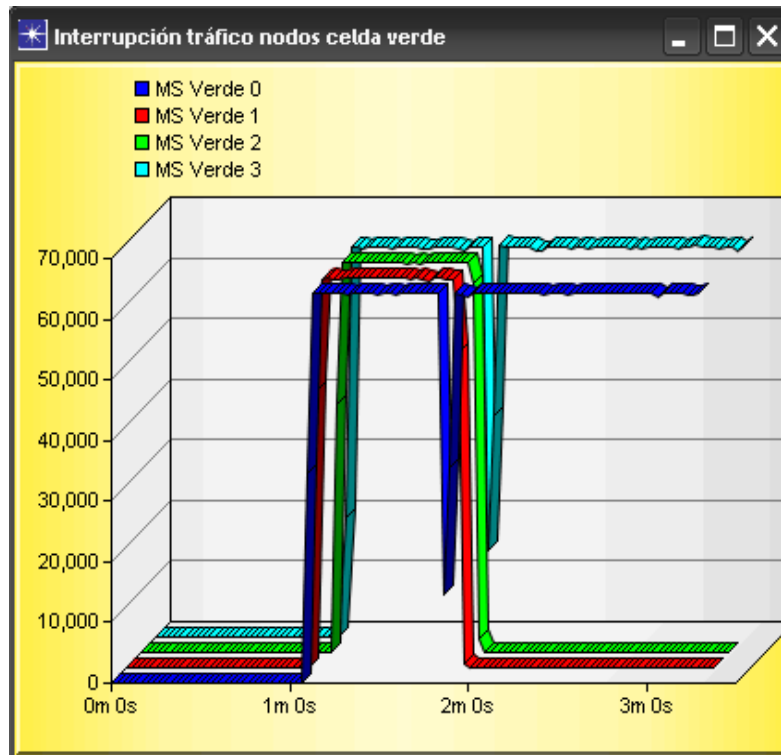
Figura 75. Cambio *BS ID* nodos *MS* celda verde antes *Handoff* forzado



Fuente: Autores

Solo dos nodos de la celda verde (*MS_Verde_0* y *MS_Verde_3*) son aceptados por la estación base de la celda azul, los otros dos nodos (*MS_Verde_1* y *MS_Verde_2*) son rechazados, como se puede observar en la figura 76. Esto se debe a la falta de recursos disponibles por parte de la estación base de la celda azul en el momento donde existe saturación de tráfico.

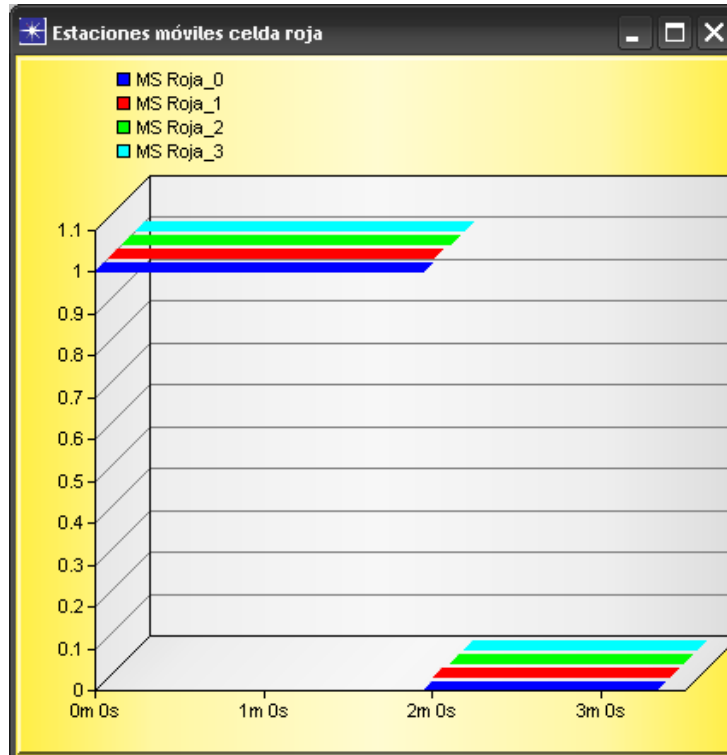
Figura 76. Comportamiento tráfico nodos celda verde antes *Handoff* forzado (bps)



Fuente: Autores

En la figura 77 se puede observar el cambio de *BS ID* de las estaciones de la celda roja a los 115 segundos de simulación aproximadamente, pasando del *BS ID* 1 de la estación base inicial a la *BS ID* 0 de la estación base de la celda azul.

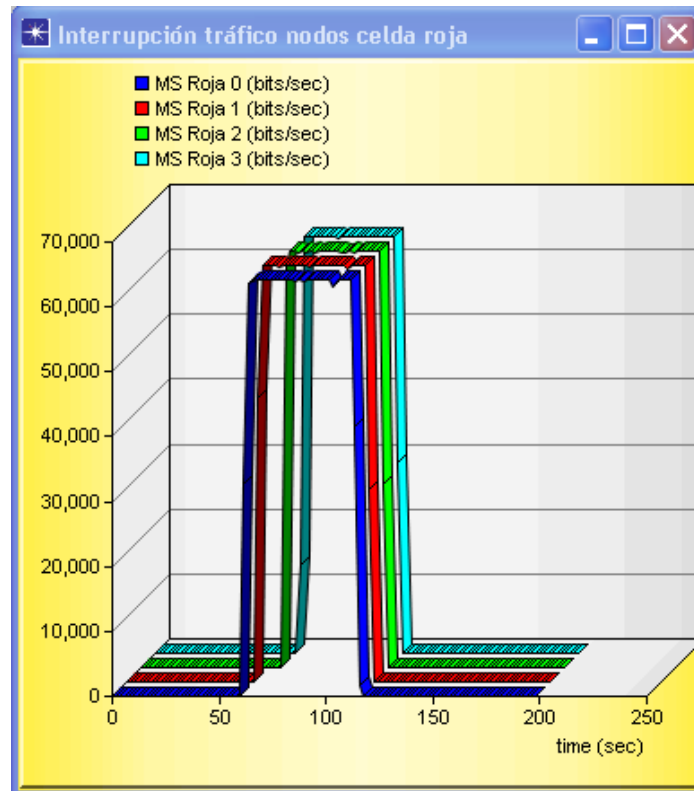
Figura 77. Cambio *BS ID* nodos *MS* celda roja antes *Handoff* forzado



Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 78, todos los nodos de la celda roja son rechazados por la estación base de la celda azul al momento de realizar el *Handoff* debido a que la celda azul ya no tiene recursos disponibles para aceptar nuevas conexiones, por esta razón, el ancho de banda de estas comunicaciones cae a cero *bps*. Estos nodos solo generan tráfico de voz por 60 segundos aproximadamente.

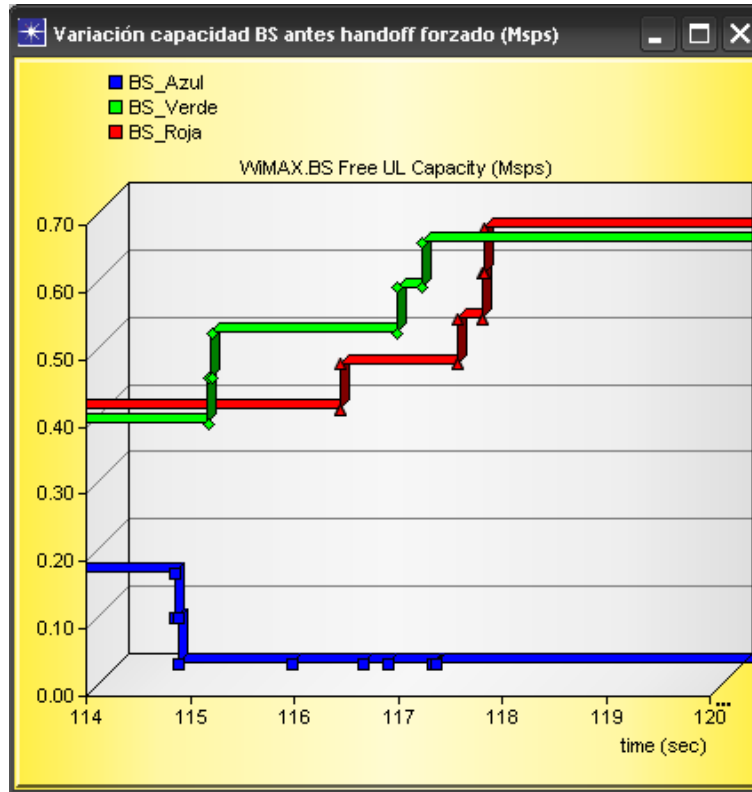
Figura 78. Comportamiento tráfico nodos celda roja antes *Handoff* forzado



Fuente: Autores

En la figura 79 se puede observar como el ancho de banda de las estaciones base varia cuando los nodos *SS* y *MS* entran y salen de las celdas debido al proceso de *Handoff* normal. A medida que los nodos *MS* de las celdas roja y verde entran a la celda azul, los recursos de ancho de banda se ven reducidos notablemente. Cada nodo *MS* requiere aproximadamente 70 *Ksps* para su conexión tipo *UGS*. Los recursos de la celda azul se vuelven insuficientes alrededor de los 115 segundos. Los recursos de ancho de banda de las celdas roja y verde aumentan a medida que los nodos *MS* dejan estas celdas debido al desplazamiento hacia la celda azul. Los recursos son liberados en el momento en el cual el tiempo de retención expira (tiempo que dura el proceso de *Handoff* entre celdas), esto quiere decir que el proceso de *Handoff* normal ha sido completado.

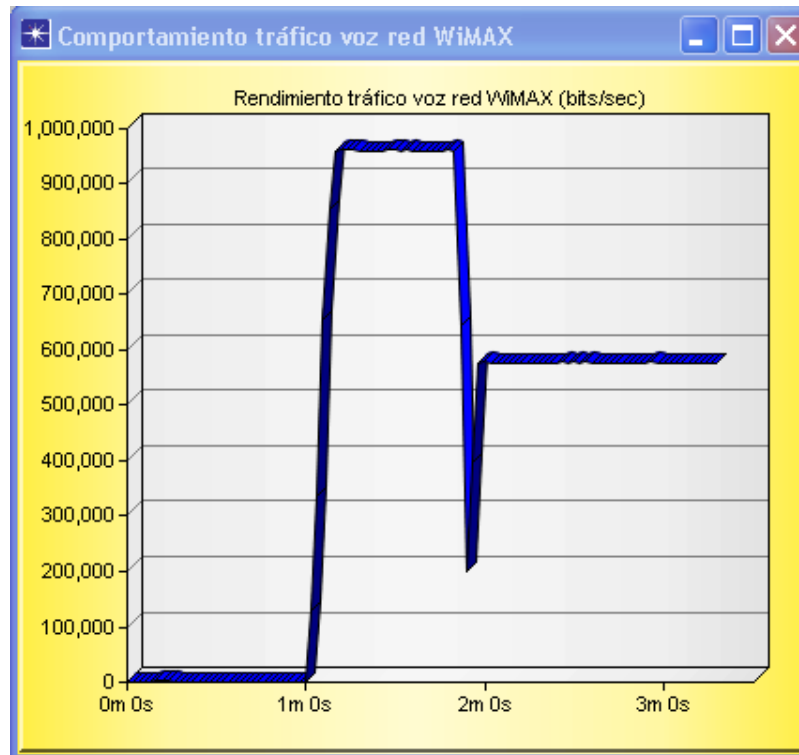
Figura 79. Variación ancho de banda estaciones base antes *Handoff* forzado



Fuente: Autores

En la figura 80 se observa que el tráfico de voz generado por todos los nodos SS de la red *WiMAX* (todas las celdas) es 960 *Kbps* aproximadamente. Solo 9 nodos SS permanecen generando tráfico de voz, mientras que 6 nodos SS son rechazados, lo que incide en una caída en la carga de tráfico a 550 *Kbps* aproximadamente después del *Handoff* normal.

Figura 80. Comportamiento tráfico voz red *WiMAX* antes *Handoff* forzado



Fuente: Autores

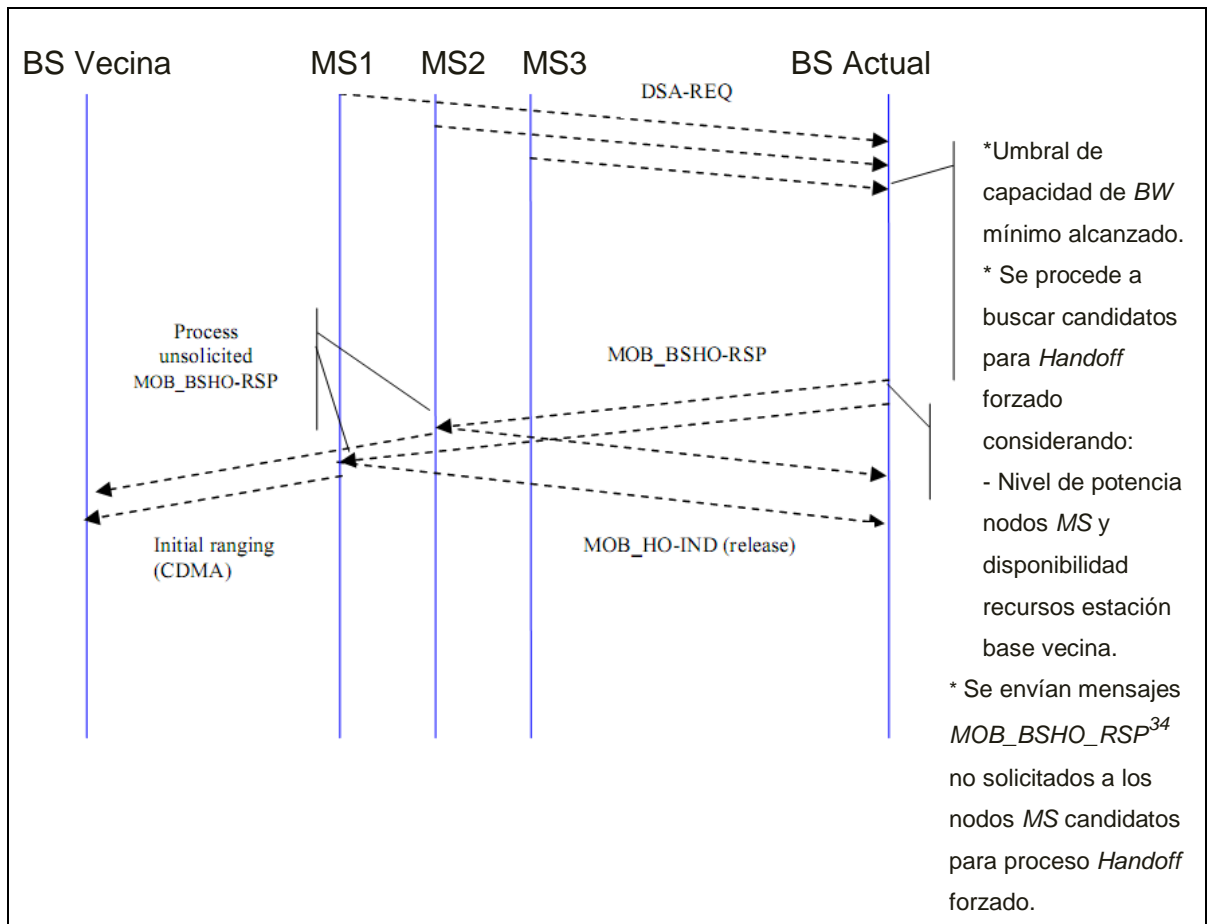
- **Segunda parte: Modificación para el uso *Handoff* forzado en la red *WiMAX***

Para evitar este rechazo de nodos en la red *WiMAX* y dar continuidad al servicio de voz, se utilizó el proceso de *Handoff* forzado de modo que se eviten situaciones de pérdida de tráfico.

El proceso de *Handoff* forzado es mostrado en la figura 81 mediante una ventana de transmisión. Los mensajes *DSA-REQ* son mensajes de administración en *WiMAX* que pueden ser difundidos mediante *broadcast* o por *CID* (*Connection Identifier*) mediante los cuales, los nodos *MS* envían los parámetros de QoS requeridos por el tráfico que este va a transmitir en la red *WiMAX*. Los mensajes tipo *MOB_HO-IND* son transmitidos desde el nodo *MS* a la estación base actual

para informarle a esta la finalización del proceso de *Handoff* el cual resulta en el abandono del nodo *MS* a su estación base actual.

Figura 81. Proceso de *Handoff* forzado red *WiMAX*



Fuente: Autores

Para esta segunda parte de la simulación fue necesario realizar unas modificaciones al código *opnk_1571_wimax_mobility_support* que está escrito en Código externo en lenguaje C (*External Source (C code)*). Estas modificaciones se

³⁴ *Mobile BS Handoff Response (MOB_BSHO-RSP)*: Mensaje que envía la estación base al nodo *MS* como respuesta a la petición de iniciar el proceso de *handoff*.

tomaron de ³⁵. Como un aporte nuestro se ha agregado una explicación de algunas líneas de este código.

Para que se pueda realizar el proceso de *Handoff* forzado, se deben contemplar dos condiciones:

- La diferencia de la intensidad del señal del nodo SS con respecto a la estación base vecina y estación base actual debe ser inferior a 150 mW.
- La estación base vecina debe tener al menos un 30% de su capacidad libre.

Si estas condiciones se cumplen, se procede a enviar un mensaje tipo *unsolicited handoff commands* a cada nodo MS que se considere candidato para realizar el *Handoff* forzado.

La estación base que tiene agotados sus recursos de ancho de banda, procede a verificar si las estaciones base cercanas tienen disponibilidad de recursos para que puedan aceptar a los MS candidatos y dar continuidad al servicio.

En la figura 82 se puede observar que una vez se haya verificado la existencia de estaciones base cercanas, se procede a comprobar si las condiciones para realizar el *Handoff* forzado de las estaciones MS candidatas son cumplidas.

³⁵ *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies 2007.

Figura 82. Código para verificar parámetros de la BS destino

```

if (!wimax_mob_opnk07_alert_capacity_reached (nbr_info_elem_ptr->nbr_info_ptr->bs_params_ptr->capacity_spf +
nbr_info_elem_ptr->estimated_extra_capacity_spf + ms_info_ptr->assigned_capacity_spf,
nbr_info_elem_ptr->nbr_info_ptr->bs_params_ptr->max_capacity_spf))
{
/* La estación base destino tiene los suficientes recursos disponibles, se procede a determinar su BS ID*/
bs_id_int = (int) *(nbr_info_elem_ptr->nbr_info_ptr->bs_id_ptr);
/* Se obtiene la medida de la intensidad de la señal entre el nodo MS y la estación base destino*/
wimax_support_measurement_by_type_read (WimaxC_CINR, bs_id_int,
wimax_sup_rx_state_from_data_plane_get(ms_info_ptr->ms_mob_info_ptr->data_plane_config_ptr),
&nbr_bs_value_measured);
/*Se considera unicamente las estaciones vecinas con las cuales la intensidad de la
señal este por encima de los 150 mW con relación al nodo MS a realizarel handoff forzado*/
if ((serv_bs_value_measured - nbr_bs_value_measured) > 150 /* mW*/)
{
/* Se selecciona aquella estación base que tenga la mayor intensidad de señal.*/
if (prev_nbr_info_elem_ptr == OPC_NIL || (nbr_bs_value_measured > selected_nbr_measurement))
{
/* Se almacenan los datos referentes a la estación base destino y el nodo MS */
selected_nbr_measurement = nbr_bs_value_measured;
nbr_info_elem_ptr->estimated_extra_capacity_spf += ms_info_ptr->assigned_capacity_spf;
/* Se considera la esta estación base destino como el nuevo objetivo del nodo MS.*/
ms_info_ptr->ms_ho_state_ptr->target_BS = bs_id_int;
if (prev_nbr_info_elem_ptr != OPC_NIL)
prev_nbr_info_elem_ptr->estimated_extra_capacity_spf -= ms_info_ptr->assigned_capacity_spf;
prev_nbr_info_elem_ptr = nbr_info_elem_ptr;
}
}
}
}
}
/* Si los datos son correctos, significa que se ha encontrado una estación base para el nodo MS.*/
/* Se procede a almacenar la información del nodo MS.*/
if (selected_nbr_measurement != -9999.0)
op_prg_list_insert (ms_forced_ho_lptr, ms_info_ptr, OPC_LISTPOS_TAIL);
/* Se realiza el procesamiento del nodo MS.*/
ms_count--;
}
/* Si la lista no esta vacía, significa que hay mas de un nodo MS candidatos para el proceso de handoff forzado*/
if (op_prg_list_size (ms_forced_ho_lptr) > 0)
{
/*Se realizan el procedimiento para transferir los datos requeridos para realizar el proceso de handoff forzado.*/
forced_ho_info_ptr = (WimaxT_Bs_Forced_Ho_Info *) op_prg_mem_alloc (sizeof (WimaxT_Bs_Forced_Ho_Info));
forced_ho_info_ptr->ms_lptr = ms_forced_ho_lptr;
forced_ho_info_ptr->data_plane_config_ptr = data_plane_config_ptr;
/* Se planifica un evento después de pasados 0.5 segundos para realizar el handoff forzado */
op_intrpt_schedule_call (op_sim_time () + 0.5, 0, wimax_mob_opnk07_send_forced_ho_process_call,
(void*) forced_ho_info_ptr);
/* El proceso de handoff forzado ha sido planificado*/
data_plane_config_ptr->forced_ho_scheduled = OPC_TRUE;
}
FOUT;
}

```

Fuente: Autores

- **Tercera parte: Movilidad con *Handoff* forzado en la red WiMAX**

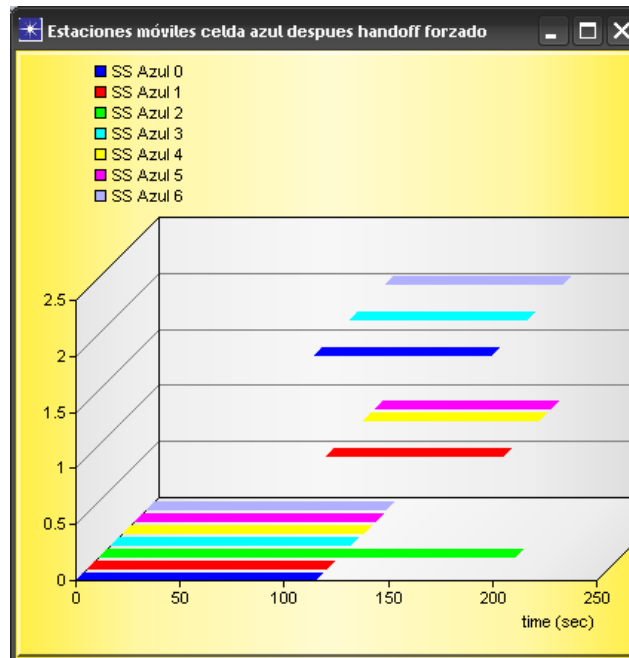
A continuación se explicará cómo quedan distribuidos los nodos SS en la red WiMAX después del proceso de *Handoff* forzado (ver figura 83).

Después de realizar el proceso de *Handoff* forzado algunos nodos de la celda azul, cambiaron de *BS ID* (eje Y figura 83). Ahora, seis de estos nodos realizaron el proceso de *Handoff* forzado hacia las celdas roja y verde.

- Los nodos *MS_Azul_0*, *MS_Azul_3* y *MS_Azul_6* cambiaron hacia la celda verde, que era su celda más cercana al momento de realizar el *Handoff* forzado.
- Los nodos *MS_Azul_1*, *MS_Azul_4* y *MS_Azul_5* cambiaron hacia la celda roja, que era su celda más cercana al momento de realizar el *Handoff* forzado.
- El nodo *MS_Azul_2* no realizó ningún tipo de *Handoff* forzado. Para este nodo, la medida de la relación señal a ruido de la estación azul (actual), respecto al nivel de potencia con las otras estaciones base (roja y verde), es mayor, debido a su distancia respecto su estación base actual (ver figura 83 línea verde).

Nótese que los nodos de la celda azul siguen siendo SS, lo cual implica que el cambio de *BS ID* se debió únicamente por el *Handoff* forzado al estar localizados en el límite de la celda azul donde el nivel de potencia es bajo con relación al nivel con las celdas roja y verde.

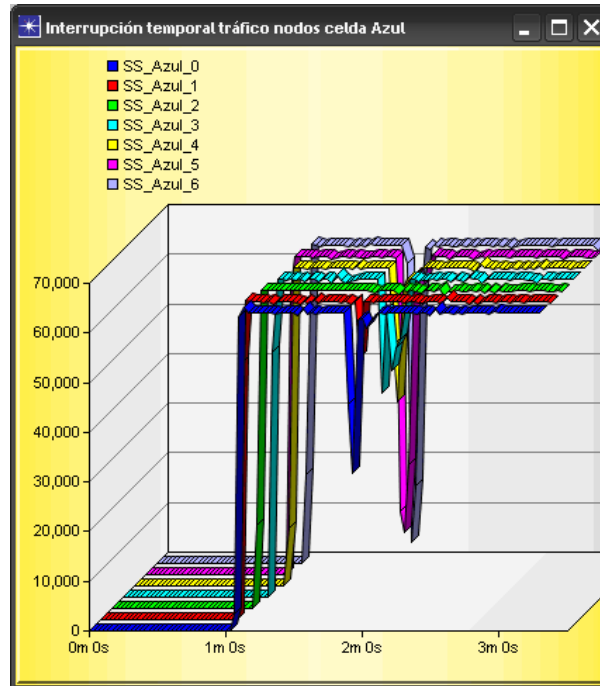
Figura 83. *BS ID* nodos celda azul después de *Handoff* forzado



Fuente: Autores

En la figura 84 se puede observar que el tráfico de algunos nodos de la celda azul (SS_Azul_0, SS_Azul_1, SS_Azul_3, SS_Azul_4, SS_Azul_5 y SS_Azul_6) sólo es momentáneamente interrumpido por la cercanía de los demás nodos de la celda verde y roja de la red *WiMAX* que realizan el proceso de *Handoff* para entrar a la celda azul.

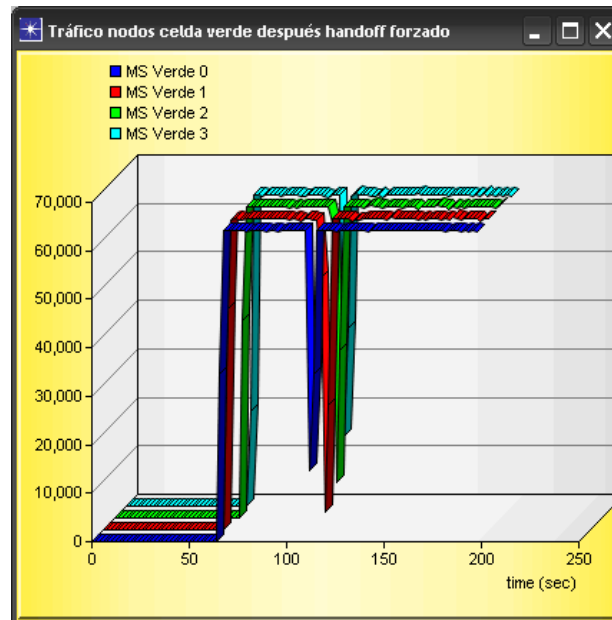
Figura 84. Comportamiento tráfico nodos celda azul con *Handoff* forzado (*bps*)



Fuente: Autores

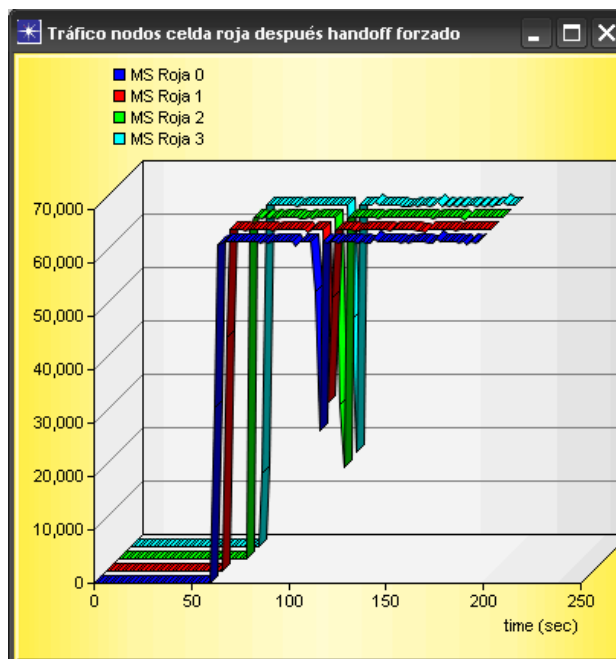
En las figuras 85 y 86 se puede observar que el tráfico de los demás nodos de la red (nodos celda verde y nodos celda roja), solo sufren una interrupción momentánea. Esta continuidad en el servicio, solo es posible cuando existen técnicas de *Handoff* forzado en una red *WiMAX*, ya que en condiciones donde difícilmente se puede proveer un servicio a ciertos nodos de la red, el tráfico de estos nodos obtiene un alto nivel de confiabilidad. Esto contrasta con el comportamiento registrado en las figuras 76 y 78 en las cuales el tráfico generado por algunos de estos nodos era interrumpido al momento de hacer el proceso de *Handoff* normal hacia la celda azul la cual no tenía recursos disponibles de ancho de banda suficientes para aceptar a todos los nodos.

Figura 85. Comportamiento tráfico nodos celda verde con *Handoff* forzado (bps)



Fuente: Autores

Figura 86. Comportamiento tráfico nodos celda roja con *Handoff* forzado (bps)



Fuente: Autores

En la gráfica 86, se puede observar como la capacidad de las estaciones base varía cuando los nodos SS entran y salen de las celdas, debido al proceso de *Handoff* forzado. Cada nodo SS requiere aproximadamente entre 60 *Ksps*³⁶ y 70 *Ksps* de los recursos de ancho de banda para cada estación base.

A los 115 segundos de simulación aproximadamente, la estación base azul, reduce su capacidad en aproximadamente 140 *Ksps*, después de que la estación base verde libere una cantidad similar de recursos. Esto quiere decir, que la estación base azul admite dos nodos provenientes de la celda verde.

Esto incide directamente en una asignación considerable de recursos para la estación base azul, llegando a más del 75% de su capacidad. El 100% de los recursos disponibles es de aproximadamente 650 *Ksps* por cada celda, por consiguiente el 75% de estos recursos es 488 *Ksps*. Esto quiere decir que aproximadamente 160 *Ksps* siempre estarán como recursos libres.

En este punto, la estación azul, evalúa todos los nodos SS que están dentro de su celda y crea una lista para ejecutar el *Handoff* forzado la cual tiene un tiempo de 0.5 segundos (esto es el tiempo del proceso de identificación de los nodos MS ó SS candidatos para realizar el proceso de *Handoff* forzado).

A los 115.5 segundos el mecanismo de *Handoff* forzado envía mensajes tipo *MOB_BSHO_RSP*³⁷ a los siguientes nodos MS que se encuentran en la frontera de la celda azul:

³⁶ *Ksps*: Kilo symbols per second.

³⁷ *Mobile BS Handoff Response (MOB_BSHO-RSP)*: Mensaje que envía la estación base al nodo MS como respuesta a la petición de iniciar el proceso de *handoff*.

BS destino= BS Verde

- *MS Azul 0*
- *MS Azul 3*
- *MS Azul 6*

BS destino= BS Roja

- *MS Azul 1*
- *MS Azul 4*
- *MS Azul 5*

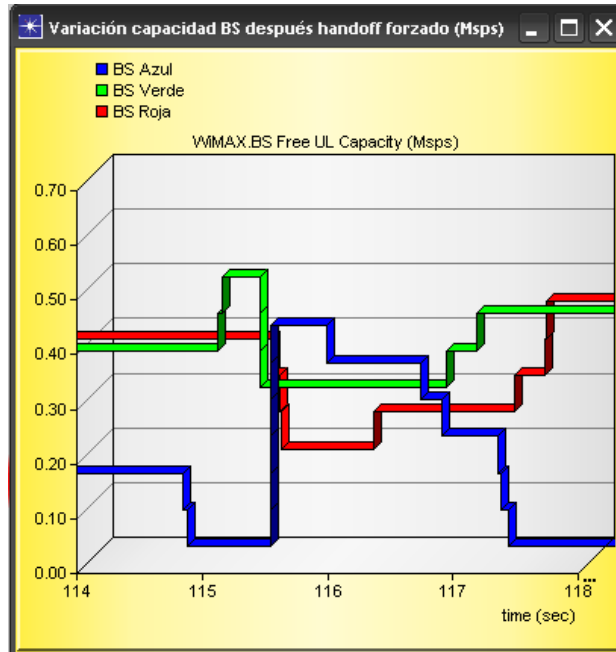
Eventualmente la estación azul incrementa sus recursos debido a la salida de estos seis nodos de su celda, lo cual se puede observar en la línea azul que se mueve de 0.05 *Mbps* hasta 0.45 *Mbps* aproximadamente. Esto se puede observar en la figura 87.

Los demás nodos *MS* siguen ingresando a la celda azul, aquí la estación base azul, decrementa sus recursos nuevamente, mientras las estaciones base verde y roja los liberan.

Al final de la simulación:

- *BS Azul tiene 9 nodos MS*
- *BS Verde tiene 3 nodos MS*
- *BS Roja tiene 3 nodos MS*

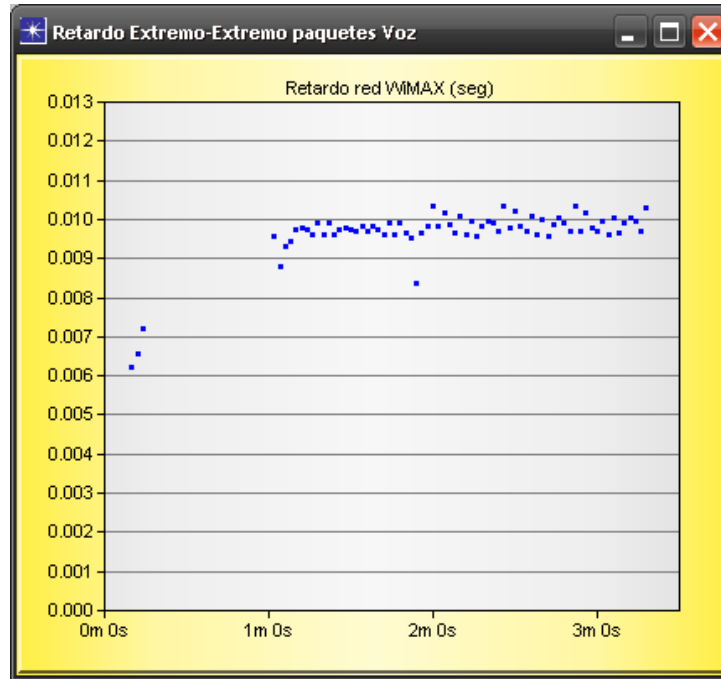
Figura 87. Variación ancho de banda estaciones base después *Handoff* forzado



Fuente: Autores

En la grafica 88 el retardo del *tráfico* de voz no se ve afectado notablemente por el mecanismo de *Handoff* forzado, lo que quiere decir, que además de ofrecer una continuidad en el servicio, el *Handoff* forzado no altera los parámetros de calidad de servicio en las aplicaciones de red.

Figura 88. Retardo extremo-extremo paquetes voz red *WiMAX*



Fuente: Autores

En las figuras 89 y 90, se puede ver la variación del retardo de los paquetes de voz en algunos nodos de la red *WiMAX*. La variación del retardo de voz en el nodo *SS Azul 6*, es de aproximadamente 0.0004 segundos representando una variación mínima que no afecta el rendimiento de la aplicación, y analizando la línea de tendencia se puede observar que este parámetro disminuye con el tiempo. La variación del tráfico de voz en los nodos *SS_Azul_2*, *MS_Verde_2* y *MS_Roja_2* pertenecientes a la celda azul, es de aproximadamente 0.0003 segundos, pero la tendencia de este parámetro aumenta ligeramente con el tiempo sin afectar el rendimiento de la aplicación. Este pequeño aumento es debido al número de nodos en la celda azul.

Figura 89. Variación tráfico voz nodo SS_Azul_6

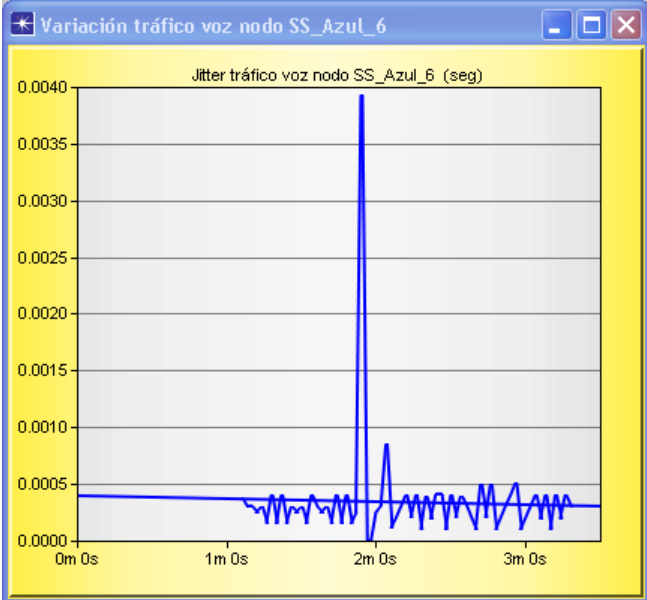
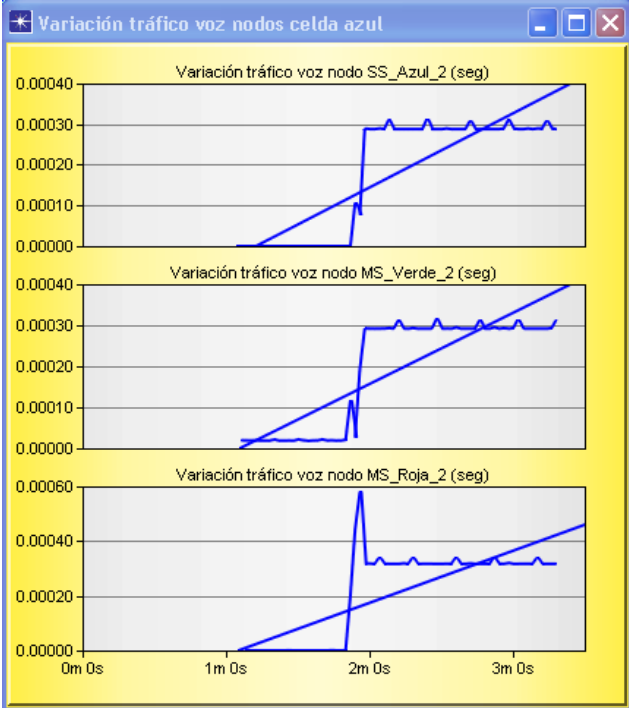


Figura. Autores

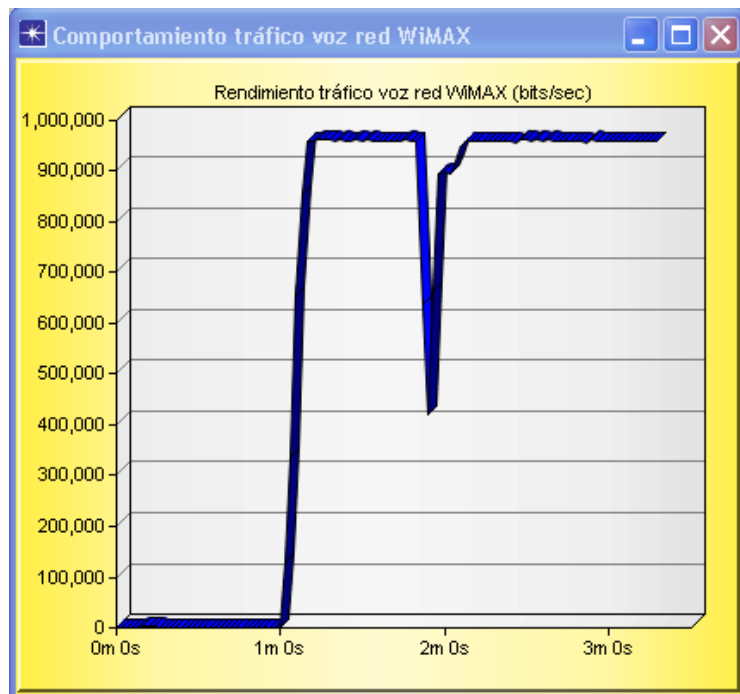
Figura 90. Variación tráfico voz nodos celda azul



Fuente: Autores

En la gráfica 91 se puede observar, que la carga tráfico total de la red, antes y después del mecanismo de *Handoff* forzado es el mismo, lo que incide en un rendimiento óptimo para la voz. Esto contrasta con el comportamiento del tráfico ilustrado en la figura 80, donde sólo aproximadamente la mitad del tráfico total generado por todos los nodos *SS* y *MS* en la red *WiMAX* continua transmitiéndose luego de ejecutar el proceso de *Handoff* normal hacia la celda azul.

Figura 91. Rendimiento red *WiMAX* después *Handoff* forzado



Fuente: Autores

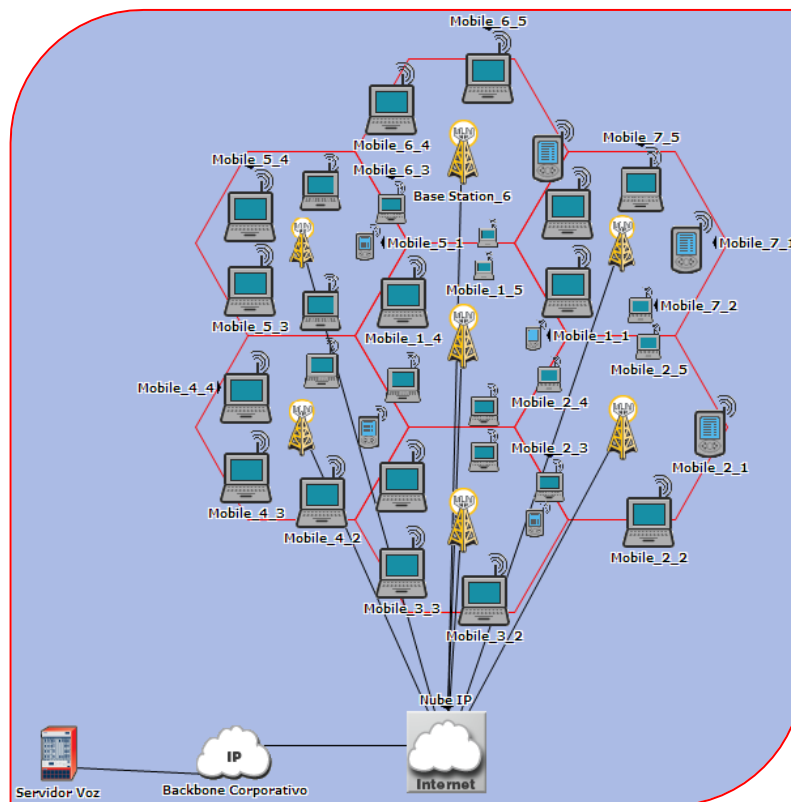
5.6.5 Movilidad con *Access Service Network (ASN)*³⁸

5.6.5.1 *Objetivo*

Analizar el comportamiento y el rendimiento de la aplicación voz en un entorno de movilidad con *Access Service Network (ASN)*³⁹.

5.6.5.2 *Descripción del Escenario*

Figura 92. Descripción del escenario



Fuente. Autores

³⁸ Basado en *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies 2008.

³⁹ *Access Service Network* es un concepto que se maneja en las redes *WiMAX*, para proveer movilidad total, transparente al proceso de *handoff*, calidad de servicio, seguridad y administración de recursos en la red y en los nodos *SS* y *BS*.

En este escenario (figura 92) se desplegará una red *WiMAX* conformada por 7 celdas con 5 nodos *MS* en cada celda. Se usará como aplicación a analizar el tráfico de voz con calidad *PCM Quality Speech* y se mostrará el buen rendimiento que se obtiene de una relación multicapa de parámetros de calidad de servicio entre las capas *IP* y *MAC* asociada a una arquitectura de red *WiMAX* con *ASN*. Se procederá a configurar los clasificadores y los *service flows* en las estaciones base y en los nodos *MS* de la red, para después mapear el tráfico de voz con los *service flows* de *WiMAX*. La movilidad de los nodos de la red será administrada por medio de una *ASN*, la cual permitirá evaluar el rendimiento de los nodos que introduzcan tráfico de voz en la red.

El modo de operación utilizado es *PMP (Point- to- Multipoint)* soportado en el estándar *IEEE 802.16*.

Se hará un análisis usando la regla de mapeo para voz indicada en la tabla 25.

Tabla 25. Mapeo implementado.

<i>IP QoS</i>	<i>MAC QoS</i>
<i>Interactive Voice (6)</i>	<i>ertPS</i>

Fuente. Autores

A continuación se describirán los parámetros de simulación:

Parámetros de funcionamiento, de acuerdo al perfil *PHY Wireless MAN SC P1*⁴⁰:

- Ancho de banda: *25 Mhz* (cada *MS*)
- Frecuencia de operación: *10 Ghz*.
- Multiplicación: *TDD (Time Division Duplexing)*.
- Modo de eficiencia implementado: *Mobility and Ranging Enabled*

⁴⁰ *PHY Wireless MAN SC P1*: Perfil de la capa física de *WiMAX* que se asocia a todos los nodos de la red.

Parámetros técnicos del escenario:

- Potencia de la estación base: 5 W
- Potencia de los nodos SS: 0.5 W
- Modulación implementada: *Adaptive Modulation (QPSK $\frac{1}{2}$ y QPSK $\frac{3}{4}$)*
- Esquema de codificación: G.711
- Radio de las celdas: 200 metros
- *Multipath Fading Model: ITU Vehicular A⁴¹*
- *Pathloss Parameter: Vehicular Environment⁴²*
- *Pathloss Model: Free Space*
- *Terrain Type: Terrain Type A⁴³*

En el *WiMAX Config Node*, se procedió a parametrizar la aplicación modificando el la clase de servicio a *GOLD* con las siguientes especificaciones:

- *Scheduling Type: ertPS*
- *Maximum Sustained Traffic Rate (bps): 96000*
- *Minimum Reserved Traffic Rate (bps): 96000*
- *Maximum Latency(milliseconds) :10*

Cada paquete de voz tiene 640 *bits*, una llamada de voz genera 100 paquetes por segundo, para un total de 64000 *bps*⁴⁴. A este tráfico se le agregan 160 *bits* de cabecera en la capa *IP* y *TCP* respectivamente.

⁴¹ *ITU Vehicular A* es más eficiente y tolerante que *ITU Pedestrian A* al fenómeno *Multipath* en entornos móviles.

⁴² Entorno de movilidad vehicular.

⁴³ Corresponde a un terreno accidentado con densidad moderada de árboles.

⁴⁴ Basado en: *Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces*. OPNET Technologies. Opnetwork 2008.

Los clasificadores en los nodos de la red (estaciones base y nodos SS) se modificaron como sigue:

- *Type of SAP: IP*
- *Traffic Characteristics :IP ToS, Equals, Interactive Voice (6)*
- *Service Class Name: Gold*

5.6.5.3 Variables a Medir

Las estadísticas que se utilizarán para la simulación son observadas en la tabla 26.

- Los valores *Node Statistic* son tomadas en los nodos *MS 2_1*, *MS 5_1* y *MS 1_1* del escenario actual.

Tabla 26. Estadísticas usadas en el escenario

VARIABLE	DESCRIPCION	TIPO ESTADISTICA
<i>Load (bits/sec)</i>	Tráfico incidente	<i>Node Statistic</i>
<i>Throughput (bits/sec)</i>	Tráfico transmitido	<i>Node Statistic</i>
<i>Delay End to End (sec)</i>	Retardo extremo-extremo	<i>Global/Node Statistic</i>
<i>Jitter (sec)</i>	Variación retardo	<i>Global Statistic</i>
<i>Traffic dropped (bits/sec)</i>	Tráfico rechazado	<i>Global Statistic</i>
<i>Queue Size (bytes/sec)</i>	Encolamiento Tráfico	<i>Global Statistic</i>
<i>Handover delay (sec)</i>	Tiempo <i>handover</i>	<i>Node Statistic</i>
<i>Scanning Interval Activity</i>	Intervalo actividad escaneo	<i>Node Statistic</i>
<i>Serving BS ID</i>	Identificador estación base	<i>Node Statistic</i>

Fuente. Autores

5.6.5.4 Metodología

A continuación se describe la metodología utilizada en esta prueba:

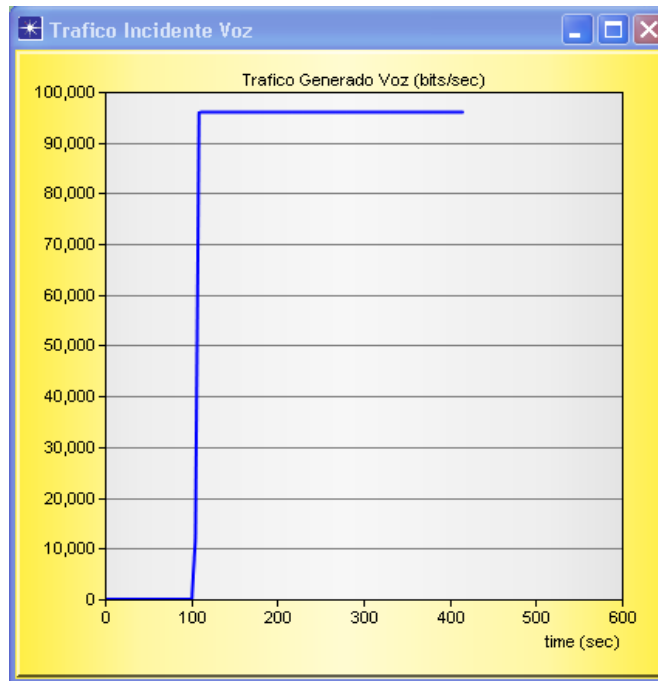
1. Se analizará el rendimiento en el tráfico de voz incidente en la red para entornos estáticos.
2. Se analizará el rendimiento en el tráfico de voz incidente en la red para entornos móviles mediante un *Handoff* normal gestionado por un nodo *ASN Gateway*.

5.6.5.5 Análisis de Resultados

- **Primera parte: Escenario con usuarios estáticos.**

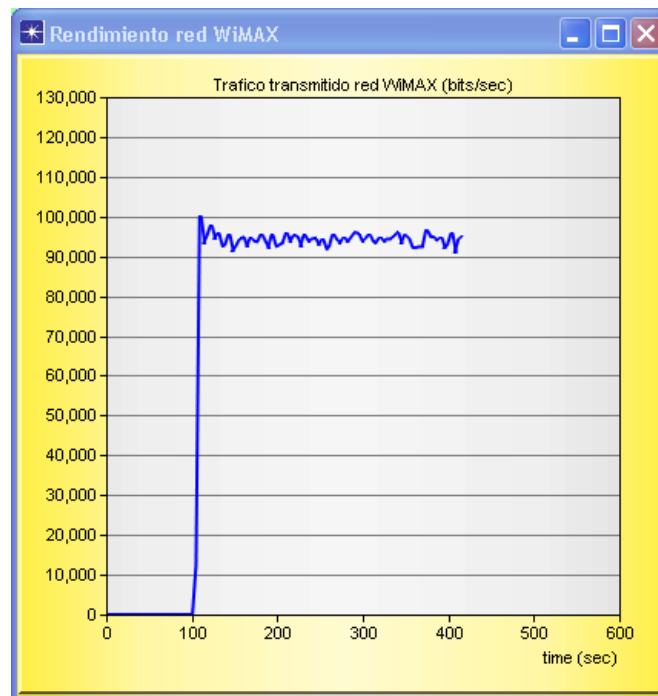
En las figuras 93 y 94 se puede observar que el tráfico incidente carga (*Load*) es similar tráfico transmitido (*Throughput*) es decir, que el rendimiento de la red *WiMAX* es favorable, debido a que se manejan unas prioridades altas en las colas de datos en los encaminadores para la aplicación voz.

Figura 93. Tráfico voz incidente red WiMAX nodo MS_2_1



Fuente. Autores

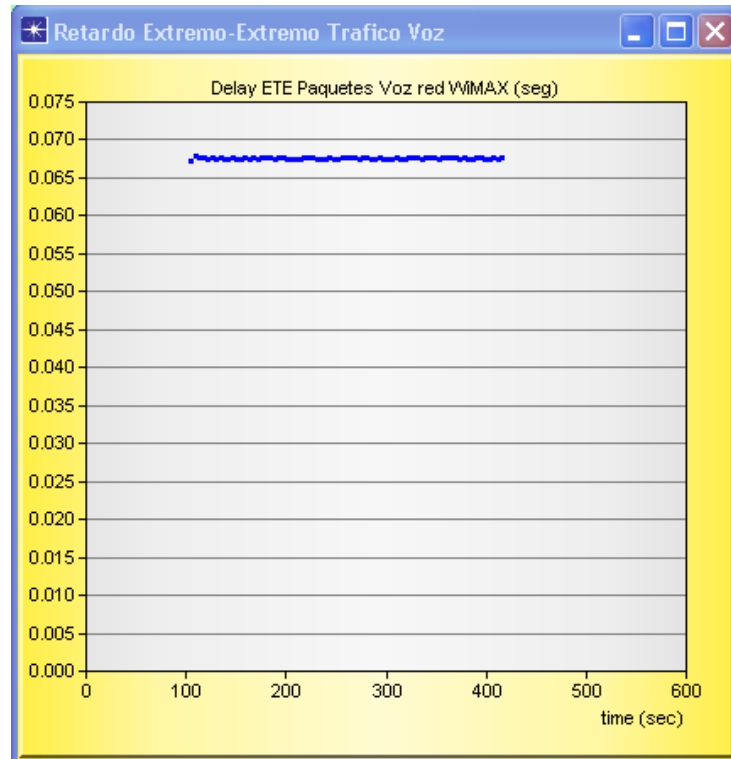
Figura 94. Tráfico voz transmitido red WiMAX nodo MS_2_1



Fuente. Autores

En la figura 95 se puede observar que el retardo extremo-extremo (*ETE: End to End Delay*), es de aproximadamente 0.068 segundos, lo que representa que el tráfico de voz, es transmitido sin problemas [35] en la red *WiMAX*, debido a las políticas de calidad de servicio usadas en la relación multicapa.

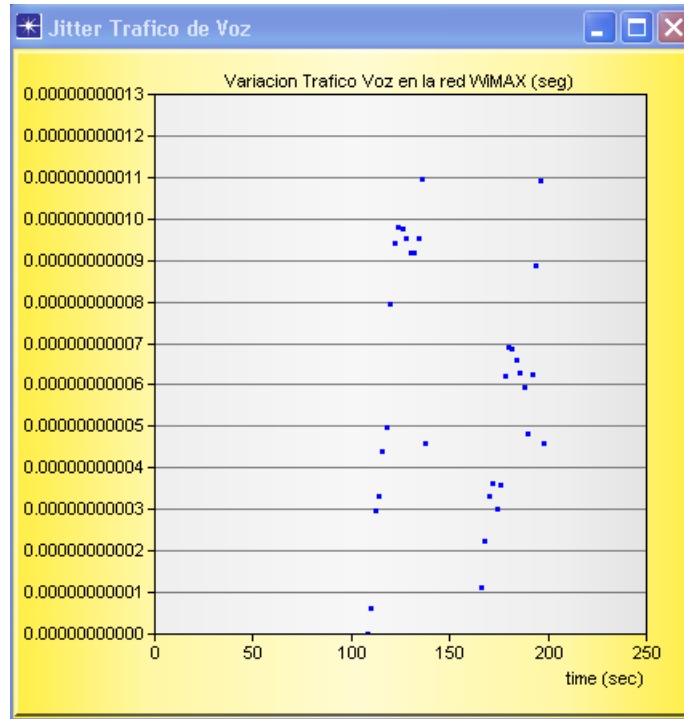
Figura 95. Retardo extremo-extremo tráfico de voz en la red *WiMAX*



Fuente. Autores

Como se puede observar en la figura 96, el *jitter* del tráfico de voz en la red *WiMAX* es muy pequeño (aproximadamente 10^{-12} segundos), este resultado es debido a los parámetros de calidad de servicio configurados en la regla de mapeo implementada para la aplicación voz.

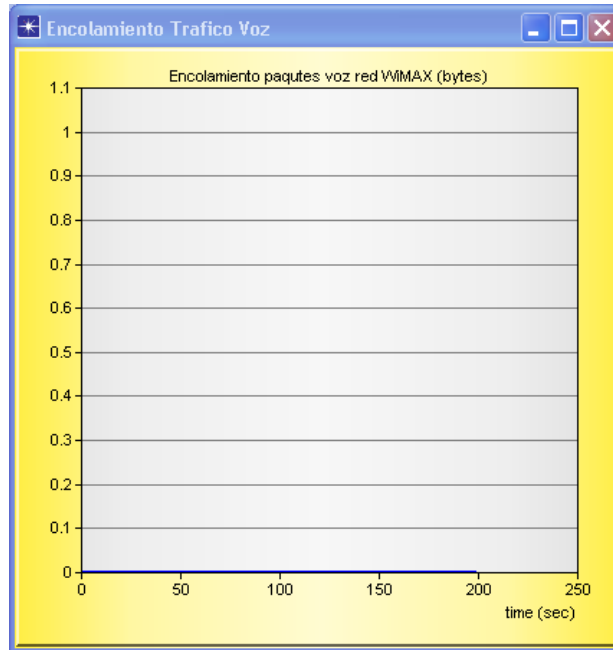
Figura 96. Variación tráfico de voz en la red *WiMAX*



Fuente. Autores

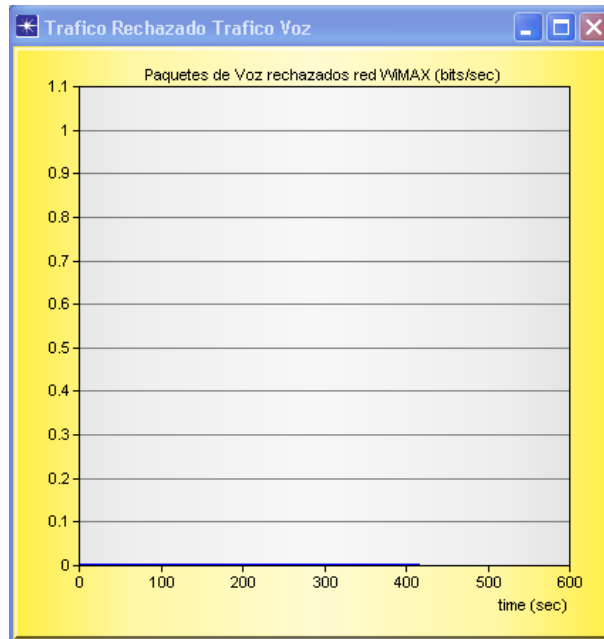
En la figuras 97 y 98 se observa que el encolamiento de paquetes y el tráfico rechazado es nulo, debido al óptimo rendimiento en el procesamiento del tráfico en los nodos intermedios (encaminadores) en la red *WiMAX*, esto es consecuencia de manejar una relación multicapa adecuada en los parámetros de calidad de servicio.

Figura 97. Encolamiento trafico red WiMAX



Fuente. Autores

Figura 98. Trafico rechazado red WiMAX

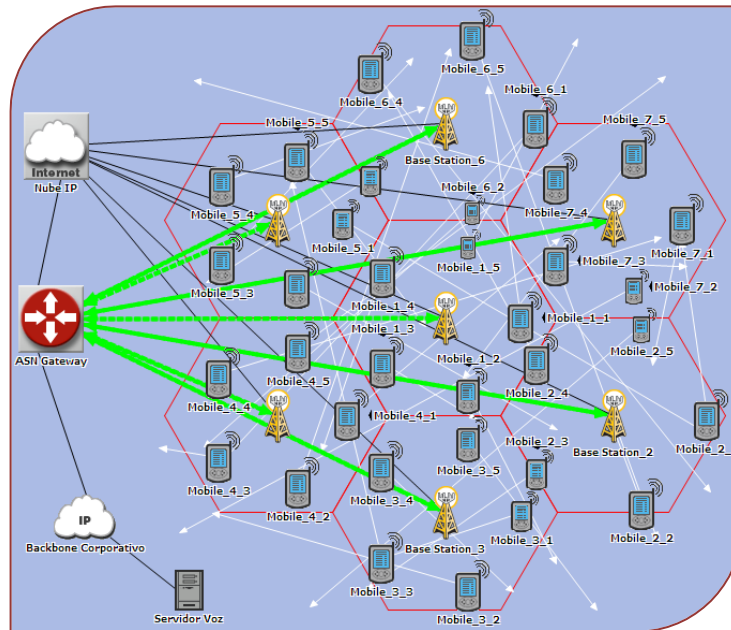


Fuente. Autores

- **Segunda parte: Escenario con movilidad con ASN**

En la figura 99 se puede observar el mismo escenario descrito inicialmente pero adicionalmente se agregó un dispositivo llamado *ASN Gateway*.

Figura 99. Movilidad con ASN



Fuente. Autores

Para esta segunda parte del escenario, se evaluaron ciertos parámetros de movilidad los cuales permitieron evaluar y analizar el rendimiento de los nodos cuando se desplazan en la red. Estos parámetros son descritos a continuación:

- **Tiempo de *Handoff* (seg):** El tiempo de *Handoff* es calculado desde el momento en que la *MS* envía a la estación base un mensaje tipo *MOB_MSHO-REQ*⁴⁵ para iniciar el proceso. Este tiempo termina cuando el

⁴⁵ *Mobile MS Handoff Request (MOB_MSHO-REQ)*: Mensaje que envía un nodo MS a la estación base para iniciar un proceso de *handoff*.

nodo *MS* adquiere su nuevo *BS ID* mediante un mensaje tipo *MOB_BSHO-RSP*.

El tiempo recomendado que debe existir desde el envío del mensaje *MOB_MSHO-REQ* y la respuesta por parte de la estación base mediante el mensaje *MOB_BSHO-RSP*⁴⁶ es de 200 ms, al cual se le denomina *Resource_Retain_Time*. El valor de este tiempo debe ser múltiplo de 100 ms. [25]

- Intervalo de actividad de búsqueda (el nodo *MS* busca al nodo *BS*): Indica el estado actual de escaneo en el que se encuentra el nodo *MS*. Los siguientes valores se toman para la simulación
 - (-1): Modo de búsqueda no activado
 - (0): El modo de búsqueda se encuentra activado, pero no está escaneando estaciones base.
 - (1): El estado de búsqueda del nodo esta escaneando las posibles estaciones base para realizar su proceso de *Handoff*.

- Cambio de *BS ID*: Muestra el *BS ID* de la estación base que está ofreciendo el servicio al nodo *MS*.

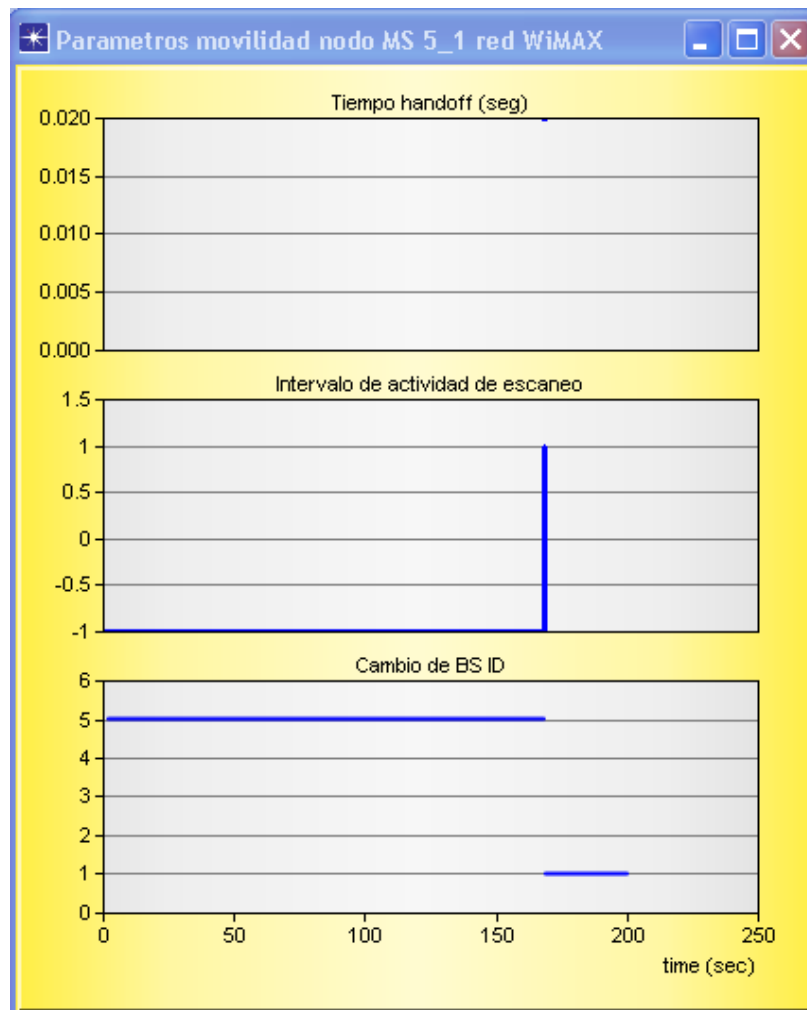
En la figura 100 se puede observar los parámetros de movilidad para el nodo *MS_5_1*. El tiempo de *Handoff* para este nodo es de 0.020 segundos, un tiempo tolerable [35] para que el tráfico de voz no se vea afectado en su rendimiento.

⁴⁶ *Mobile BS Handoff Response (MOB_BSHO-RSP)*: Mensaje que envía la estación base al nodo *MS* como respuesta a la petición de iniciar el proceso de *handoff*.

El intervalo de actividad de búsqueda presenta dos estados, uno de inactividad (-1) y el activo (1) por medio del cual se realiza una petición de *Handoff* para ingresar a una nueva celda.

En la figura 100 se observa que este nodo, presenta un cambio de *BS ID*, pasando de un *BS ID 5 (Base Station_5)* a un *BS ID 1 (Base Station_1)*. Esto sucede alrededor de los 163 segundos de simulación.

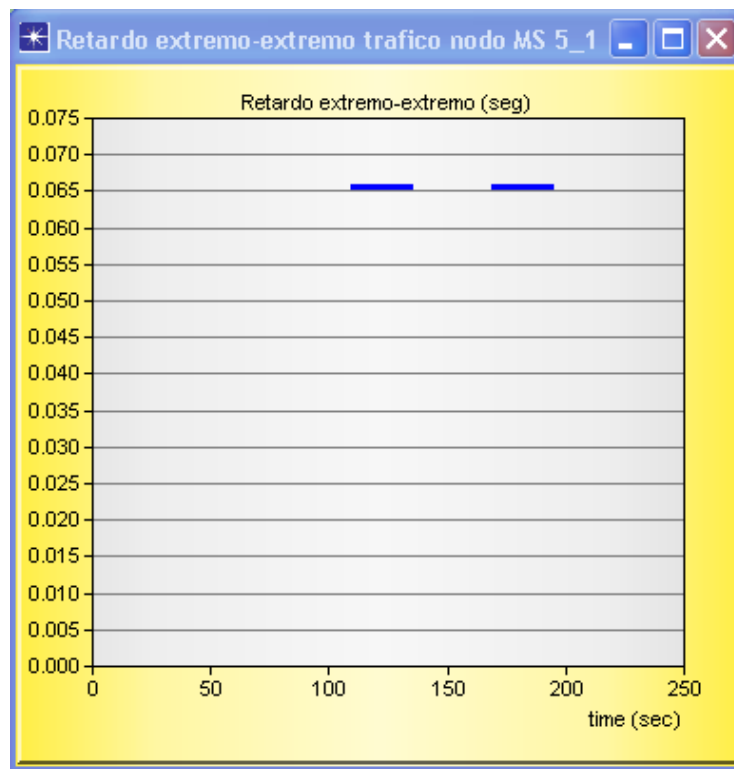
Figura 100. Parámetros movilidad nodo *MS_5_1* en la red *WiMAX*



Fuente: Autores

En la figura 101 se puede observar que el retardo extremo-extremo de los paquetes de voz generados por el nodo *MS_5_1* es de 0.065 segundos constantes aproximadamente, lo que demuestra un buen rendimiento [35] ofrecido por la red *WiMAX* debido a la relación de parámetros de calidad de servicio multicapa. En esta grafica se puede observar que el trafico tiene un patrón de repetición tipo *Serial (Ordered)* en el cual las aplicaciones empiezan a generar tráfico una después de la otra siguiendo un orden secuencial (desde la primera fila hasta la última fila), de ahí, este comportamiento de dos líneas azules horizontales separadas por un tiempo 50 segundos.

Figura 101. Retardo extremo-extremo trafico voz nodo *MS_5_1*

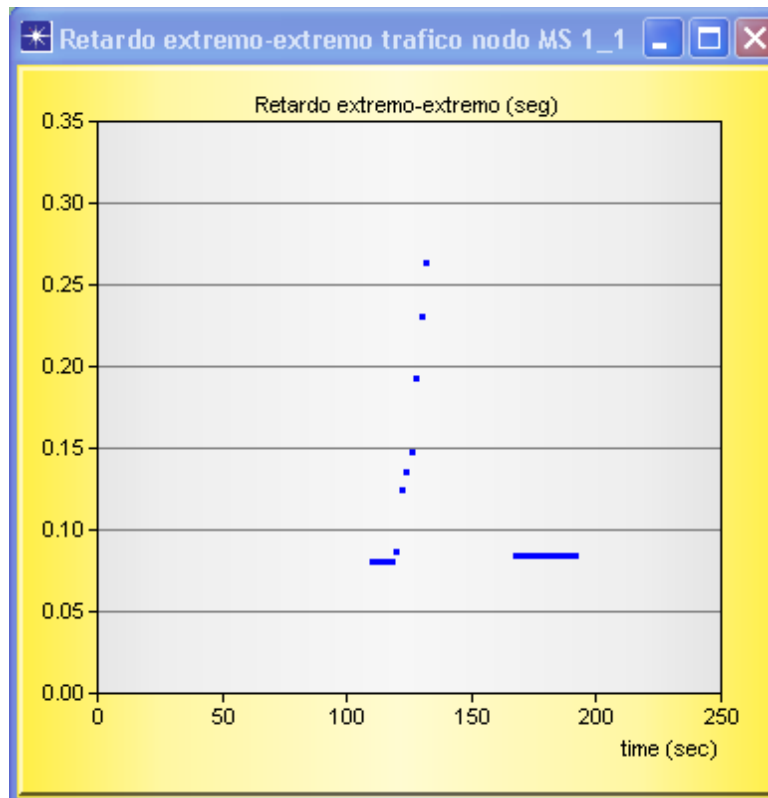


Fuente. Autores

En la figura 102 se puede observar que el retardo extremo-extremo del tráfico de voz del nodo *MS_1_1* se incrementa notablemente, llegando hasta los 270 ms, afectando de manera importante el rendimiento de la aplicación voz generada por este nodo, más adelante se explicará la causa de este incremento en el retardo.

El retardo máximo tolerado para el tráfico de voz es de 100 ms, más allá de este valor, el nodo receptor no puede construir coherentemente el tráfico, lo que genera una pérdida de información. [26]

Figura 102. Retardo extremo-extremo trafico voz nodo *MS_1_1*



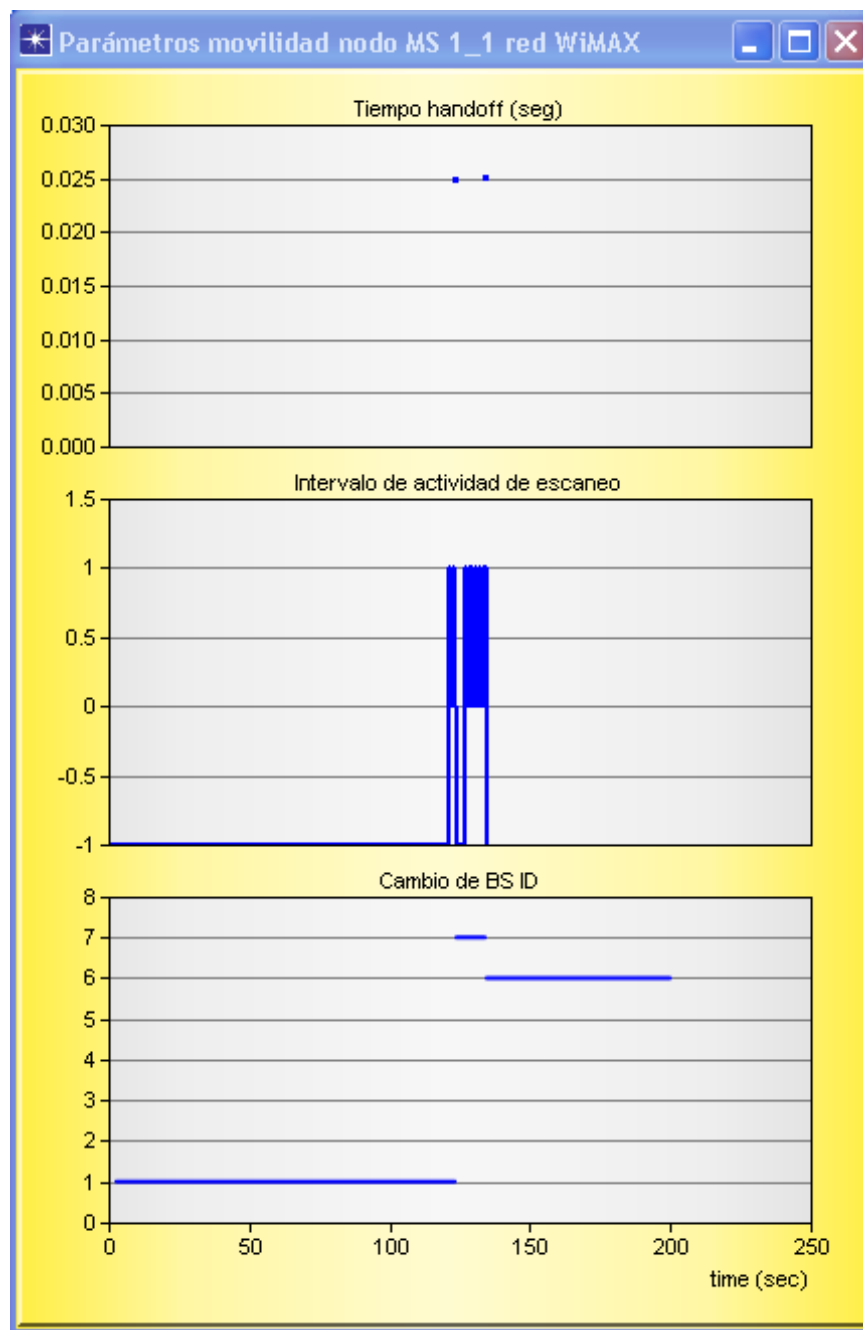
Fuente. Autores

En la figura 103 se puede observar que la trayectoria del nodo *MS_1_1* pasa por tres celdas: 1 (que es su celda origen) 7 y 6, a esto se denomina trayectoria con múltiples secciones (ver figura 104).

Esta trayectoria posee dos tiempos de *Handoff* consecutivos, un *Handoff* por cada celda atravesada adicional a su celda origen. Cada tiempo de *Handoff* tiene un valor promedio de 0.025 segundos.

El intervalo de actividad de búsqueda, es prolongado, ya que tiene que realizar casi de manera simultánea dos cambios de celda en la red, lo que ocasiona un aumento en el retraso de los paquetes de voz que genera este nodo. Cuando un nodo *MS* entra en modo de escaneo, este no permite generación de tráfico, lo que incide en un aumento en el retraso de tráfico.

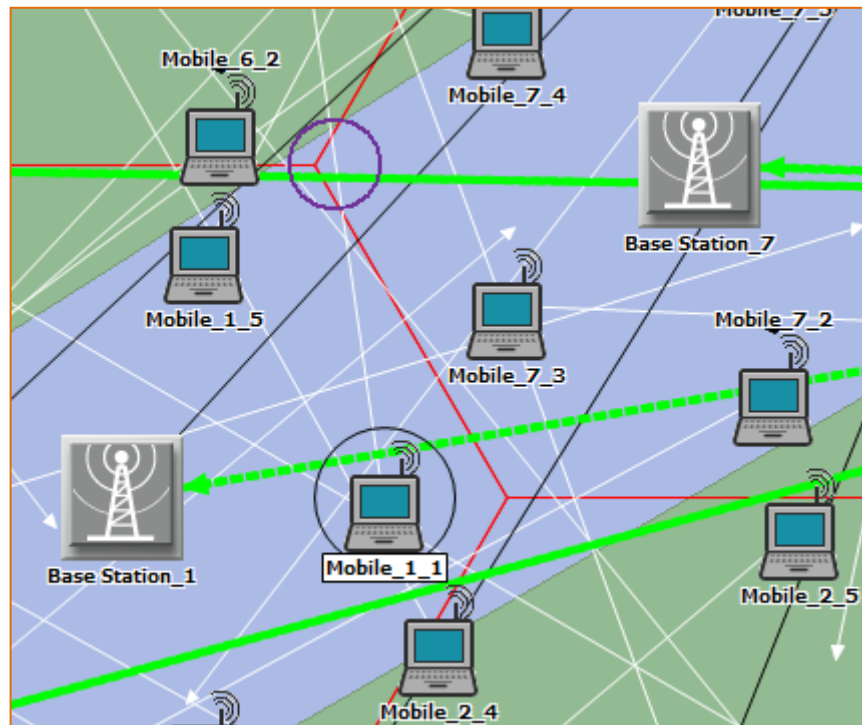
Figura 103. Parámetros movilidad nodo *MS_1_1* en la red *WiMAX*



Fuente. Autores

El cambio de celda del nodo *MS_1_1* se da en dos oportunidades, pasando del *BS ID 1* (inicial) a los *BS ID 7* y 6 de manera progresiva, como se ve en la figura 104 (circulo morado).

Figura 104. Trayectoria Nodo *MS_1_1*



Fuente. Autores

CONCLUSIONES

- Al finalizar el desarrollo de este proyecto de grado se puede concluir que se ha cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados inicialmente. Pero lo más importante, es que se consiguió fundamentar las bases para trabajos futuros en un contexto no muy estudiado en la universidad.
- Una calidad de servicio multicapa, mejora el rendimiento extremo-extremo de la red *WiMAX*, porque aumenta la confiabilidad, estabilidad y el rendimiento de cualquier aplicación. En este proyecto de grado se ha introducido un mecanismo de optimización de los parámetros multicapa en una red *IEEE 80.16* que apunta a mejorar el rendimiento de las aplicaciones de naturaleza elástica y no elásticas relacionando los parámetros de QoS de las capas *IP* y *MAC* de una red *WiMAX*.
- Se dejan planteadas las bases, para futuros proyectos, donde se puedan simular e implementar métodos remapeo, los cuales permitan una cooperación autónoma entre los diferentes *Scheduling Types* en la capa *MAC* del estándar *IEEE 802.16*.
- Se realizaron simulaciones donde se demuestran las ventajas de una relación de calidad de servicio multicapa en una red *WiMAX* donde interactúan aplicaciones con diferentes requerimientos de QoS modificando los *Scheduling Types* de *WiMAX* y su impacto en el rendimiento de las mismas.

- OPNET *Modeler*, es una herramienta de simulación de redes, confiable y estable en sus procesos, reconocida a nivel mundial por los mejores fabricantes y desarrolladores para dispositivos de *networking*. La proyección que este *software* puede brindar a la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y a su grupo de investigación en telecomunicaciones (GITEL), mediante el desarrollo de nuevos proyectos de investigación.
- La calidad de servicio en redes *WiMAX* es un tema que debe ser estudiado en aplicaciones tales como *VoIP* y demás aplicaciones multimedia. En estas aplicaciones existe la necesidad de controlar en forma permanente parámetros tales como la pérdida de paquetes, el retardo y el *jitter*, de tal manera que se optimice el transporte de paquetes de todo tipo de tráfico a través de la red siempre buscando optimizar el ancho de banda disponible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **MARINA AGUADO, OSCAR ONANDI, EDUARDO JACOB, MARIVI HIGUERO, PURI SAIZ.** *Entorno de simulación para análisis de despliegues inalámbricos basados en tecnología WiMAX Mobile.* Universidad del País Vasco UPV – EHU.2007
- [2] *International Telecommunication Union, ITU-T IMT-2000.* <http://www.itu.int/home/imt.html>. 2000.
- [3] **YI-TING MAI, CHUN-CHUAN YANG AND, YU-HSUAN LIN.** *Cross-Layer QoS Framework in the IEEE 802.16 Network.* National Chi Nan University, Taiwan, R.O.C, 2007.
- [4] **BEHROUZ A FOROUZAN.** *Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones.* 2da edición. 2002. *Mc Graw Hill.*
- [5] **DIAZ, ATAUCURI DANIEL.** *Calidad de Servicio en la Internet, Protocolo de Reserva de Recursos.* Universidad Nacional Mayor de San Marcos. No 4. Diciembre 1999.
- [6] **R.BRADEN.** *Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview, in RFC 1633. Internet Engineering Task Force.* 1994.
- [7] **R. BRADEN Y L. ZHANG.** *Resource Reservation Protocol (RSVP): IETF RFC 2205.* 1997
- [8] **TORSTEN BRAUN y THOMAS STAUB.** *End-to-End Quality of Service Over Heterogeneous Networks.*2008. *Springer.*
- [9] **BARENCO ABBAS, CLÁUDIA JACY.** *Nuevas Soluciones en la Internet: IntServ y DiffServ.* Universidad de Brasilia. 2005.
- [10] **NICHOLS, S. BLAKE, F. BAKER, D. BLACK.** *Internet Protocol Version 6 (IPv6), in RFC 2460. Internet Engineering Task Force.* 1998.

- [11] ALVAREZ, GABRIEL VERDEJO. *Seguridad en Redes IP: Los Protocolos TCP/IP*. Universidad Autónoma de Barcelona. Septiembre 2003.
- [12] IBÁÑEZ, J.A.G. *Herramientas para Desarrollo de Software Educativo sobre Internet*. Facultad de Telemática, Universidad de Colima. 1999.
- [13] QUEMADA, JUAN. *Hacia una Internet de Nueva Generación*. 2004, Universidad Politécnica de Madrid: Madrid. p. 64.2004.
- [14] JORGE ESCRIBANO SALAZAR, CARLOS GARCÍA GARCÍA, CELIA SELDAS ALARCÓN, JOSÉ IGNACIO MORENO NOVELLA. *Diffserv como una solución a la provisión de QoS en Internet*. Departamento de Ingeniería Telemática, Universidad Carlos III de Madrid: Madrid. p. 7.2002.
- [15] MONTAÑANA, ROGELIO. *Calidad de Servicio (QoS)*. Universidad de Valencia, Departamento de Informática: España. p. 83. 2006.
- [16] BLAKE, S., D. BLACK, y M. CARLSON. *An Architecture for Differentiated Services, in RFC 2475. Internet Engineering Task Force*. 1998.
- [17] BLAKE, S., D. BLACK, y M. CARLSON. *An Architecture for Differentiated Services, in RFC 1349. Internet Engineering Task Force*. 1992.
- [18] OPNET: **Manual de usuario**. Departamento de Ingeniería Telemática. Universidad Politécnica de Cataluña. 2004
- [19] KWANG-CHENG CHEN y J. ROBERTO B. De MARCA. *Mobile WiMAX*. Wiley Press. 2008.
- [20] **IEEE Standards**. *IEEE Standard 802.16 for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*.2004
- [21] SYED AHSON y MOHAMMAD ILYAS. *WiMAX Applications*. CRC Press.2008
- [22] ANDRÉS LAMELAS TORRIJOS. *WiMAX*. Ministerio de Educación de España, 2006.

- [23] **Wikipedia, la enciclopedia libre.** <http://es.wikipedia.org/wiki/WiMAX>. Agosto 11 de 2009
- [24] **JEFFREY G. ANDREWS.** *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking.* Prentice Hall. 2007.
- [25] **WILL HRUDEY y LJILJANA TRAJKOVIĆ.** *Streaming Video Content Over WiMAX Broadband Access.* Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia. Opnetwork. 2008.
- [26] **SYED AHSON y MOHAMMAD ILYAS.** *WiMAX Technologies, Performance Analysis, and QoS.* CRC Press. 2008.
- [27] **LOUTFI NUAYMI.** *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access.* Wiley. 2007.
- [28] **Introduction to WiMAX Technology Tutorials.** OPNET Technologies. Opnetwork. 2007.
- [29] **ALEXANDER KLEIN.** *Performance Comparison of Different Wimax Configurations - Impact of Scheduling and Contention Resolution on Quality of Service in Wimax Networks.* VDM Verlag. 2008.
- [30] **GEORGE AGG'ÉLOU.** *Wireless Mesh Networking.* MC Graw Hill. 2009.
- [31] **YAN ZHANG.** *Mobile WiMAX Toward Broadband Wireless Metropolitan Area Networks.* Auerbach Publications. 2008.
- [32] **CHUN-CHUAN YANG , YI-TING MAI AND y YU-HSUAN LIN.** *Cross-Layer QoS Framework in the IEEE 802.16 Network.* CACT Conference. 2007
- [33] **JIANFENG CHEN, WENHUA JIAO, QIAN GUO AN.** *An Integrated QoS Control Architecture for IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems.* Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '05. IEEE. 2005.
- [34] **OPNET Modeler.** *WiMAX Consortium Model. Software Design Document Version 2.0.* 2005.

[35] **ERMEZ Hard & Soft** .Calidad de Voz IP. http://www.ermesz.com/soporte/documentacion/Todos/AQCT_32/Web/Servidor_Trafico/Calidad_Voz_IP.htm. Octubre 2009.

[36] **Telergia: Energía en Telecomunicaciones. Dimensionado Eficiente de la Red de Acceso UMTS en Presencia de Múltiples Clases de Tráficos.** http://www.sertec.com.py/telergia/telergia/informaciones/umts_dimen3.html. Octubre 2009.

[37] **V. Markovski, F. Xue, and Lj. Trajkovic.** *Simulation and analysis of packet loss in video transfers using User Datagram Protocol* The Journal of Supercomputing, Vol. 20, No. 2, Pag. 175–196. Sept. 2001.

ANEXOS

ANEXO A

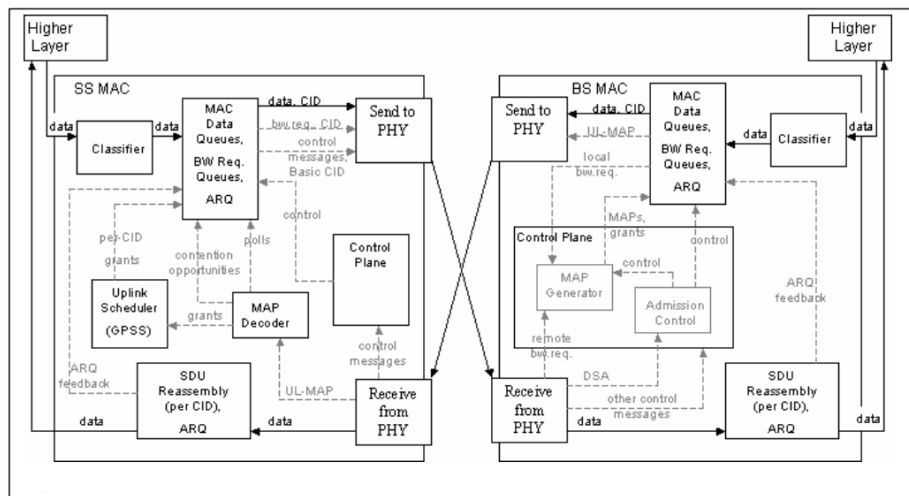
OPNET Modeler

WiMAX Consortium Model. Software Design Document [34]

RESUMEN

Este documento ofrece una descripción general del modelo *WiMAX* y de los elementos necesarios para soportar sus funcionalidades y de cómo estos elementos están relacionados.

Figura 105. Modelo esquemático del modelo *WiMAX*

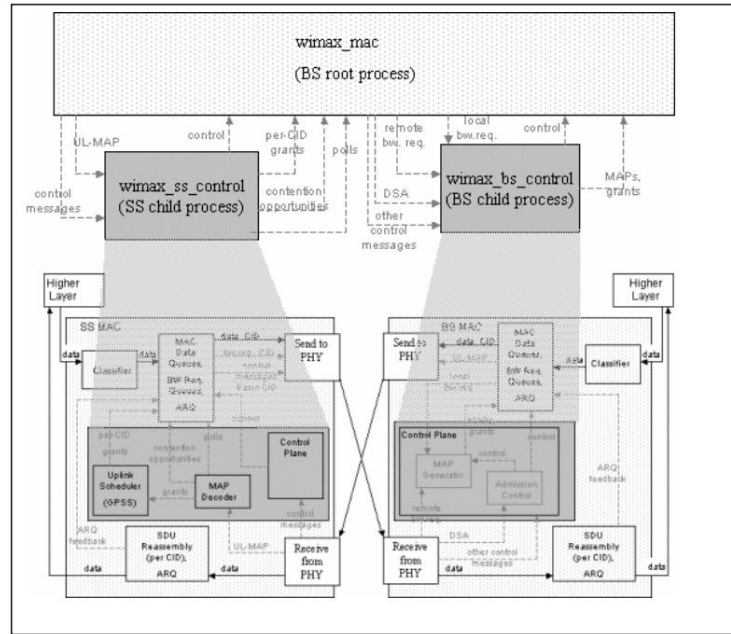


Fuente: [34]

La figura 105 muestra una descripción general de la arquitectura del modelo *WiMAX*. Básicamente dispone de dos componentes: el *SS MAC* y el *BS MAC*. Los

componentes de la capa física (*PHY*) de los nodos *Suscriber Station* y *Base Station* no son descritos en este documento, este documento está enfocado en la capa *MAC*.

Figura 106. Funcionalidad del proceso principal y el proceso derivado



Fuente: [34]

Se explicará la secuencia operacional del sistema de la figura 106. Se asume que un paquete de datos (*SDU*) proviene de una capa *IP* en el nodo *SS*. Este paquete pasa por el clasificador y luego es direccionado a la cola de datos adecuada. Si el *ARQ* no está habilitado para la conexión correspondiente a la cola, la llegada del nuevo paquete *SDU* activa la petición de reserva de ancho de banda. Una vez la petición de reserva de ancho de banda se recibe en la estación base, este mensaje se pone en cola en el *MAP Generator* (por ser una petición de reserva de ancho de banda del nodo *SS*). Finalmente se concede la reserva de ancho de banda por parte de la estación base. La petición de reserva de ancho de banda atraviesa la red en forma de *IE* en un *Up Link-MAP* enviado desde la *BS* y recibido

en el nodo SS. El modulo “*Receive from PHY*” recibe el *Up Link-MAP* y lo conduce hacia el *MAP Decoder*. El *MAP Decoder* extrae el *IE* y lo lleva hacia el planificador *GPSS (GPSS Scheduler)*. El planificador *GPSS* probablemente (pero no es garantizado, en teoría), direccionará el *IE* describiendo la petición hacia la conexión que la generó. Finalmente, la petición es utilizada por el nodo SS para enviar un paquete *MAC PDU* que surgió al encapsular el *SDU*. El *SDU* es recibido en la *BS*, pasa a través de un proceso de re-ensamblaje (en este caso el proceso de re-ensamblaje no es requerido, porque se asume que la petición se puede enviar en un solo paquete), y es convertido a partir de la *PDU* de *MAC* en *SDU*, que es posteriormente enviado a la capa *MAC*.

SECUENCIAS OPERACIONALES

Inicialización y Análisis de Atributos

El proceso de inicialización y análisis de atributos es realizado en interrupciones tipo *begsim* mediante los siguientes procesos principales: *wimax_mac* y *wimax_attribute definer*.

Control de Admisión

En esta sección, se describe la secuencia del control de admisión.

Evento 1.1: El nodo SS termina de analizar los flujos de servicio. El nodo SS crea un mensaje *DSA-REQ* y lo envía al nodo *BS*.

Evento 1.2: El nodo *BS* recibe el mensaje *DSA-REQ*. Este mensaje es recibido como una interrupción en el proceso principal *wimax_mac*.

Decisión 1.1: Basado en el campo de identificación del paquete, este será identificado como un paquete de control.

Acción 1.1: Se realiza un llamado al proceso derivado *wimax_bs_control*. Este proceso derivado, es llamado para manejar el paquete de control.

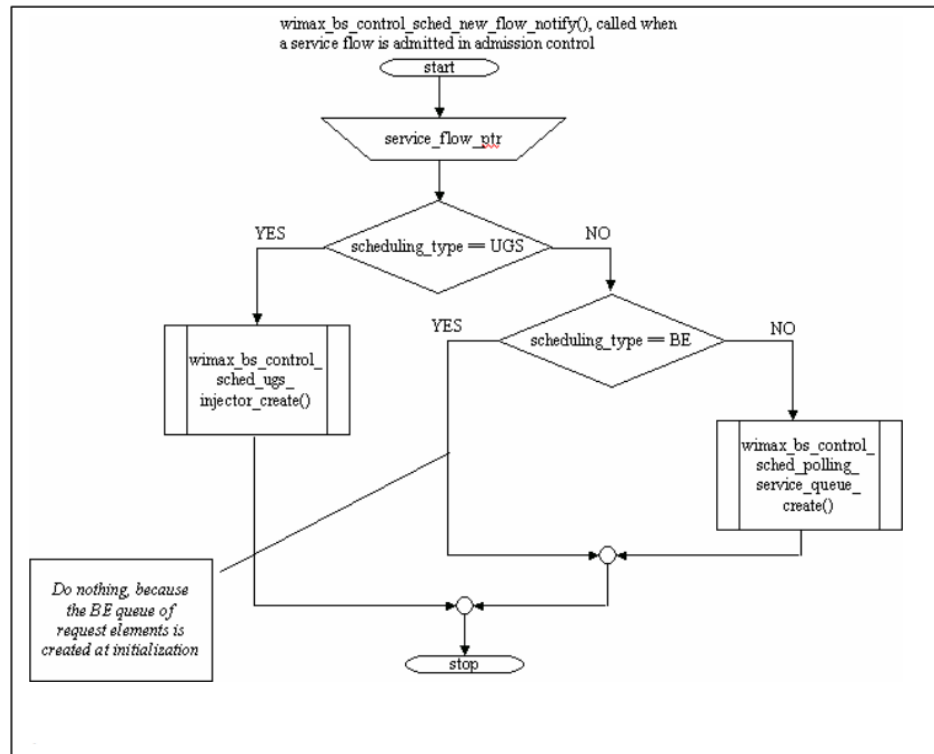
Evento 1.3: El proceso derivado *wimax_bs_control* es llamado.

Decisión 1.2: El proceso derivado *wimax_bs_control* ahora es capaz de reconocer desde el proceso *Argument memory (argmem)* que está siendo llamado con un *DSA-REQ* para un flujo de servicios.

Acción 1.2: El control de admisión es ejecutado por los servicios de flujo cuyo *DSA-REQ* sea procesado. Si el control de admisión es satisfactorio:

1. Un *CID* es generado para la nueva conexión.
2. El plano de datos en el nodo *BS* es cambiado adecuadamente (por ejemplo: nuevas colas de datos son formadas para alojar la nueva conexión.)
3. El planificador de permisos en el nodo *BS* esta actualizado. Para este efecto, la función *wimax_bs_control_sched_new_flow_notify ()* es llamada. Para una conexión admitida con una clase de servicio *UGS*, un estado debe ser creado. Este estado corresponde a *WimaxT_UGS_Request_Injector*. Un esquema de la función *wimax_bs_control_new_flow_notify()* se ve a continuación:

Figura 107. Admisión de un flujo de servicio activando un estado de flujo de servicio en el generador MAP



Fuente: [34]

Acción 1.3: Un paquete *DSA-RSP* es enviado al nodo *SS*. El paquete contiene la decisión de admisión.

Evento 1.5: El proceso *wimax_mac* en el nodo *BS* recibe un paquete *DSA-RSP*.

Decisión 1.3: Basado en el campo de identificación de paquete, este puede ser identificado como un paquete de control.

Acción 1.4: El proceso derivado *wimax_ss_control* es llamado. Este proceso derivado es llamado con el propósito de intervenir en paquete de control.

Evento 1.6: El proceso derivado *wimax_ss_control* es llamado.

Acción 1.5: Si el proceso de admisión es satisfactorio, el plano de datos es modificado como corresponde creando colas de datos para la nueva conexión.

SOLICITUDES DE ANCHO DE BANDA, PERMISOS Y TRANSFERENCIA DE DATOS PARA *rtPS*, *nrtPS* Y *BE*.

En esta sección se seguirán las rutas tomadas por un paquete *MAC SDU* en su llegada al transmisor hasta que este es entregado a la capa *MAC* en el receptor. En particular, se cubrirán los tipos de transferencia de datos a través de conexiones *rtPS*, *nrtPS* y *BE* (las conexiones tipo *UGS* se tratarán más adelante).

Evento 2.1: Un paquete de datos (*SDU*) proviene de la capa *IP* en el nodo *SS*. Este paquete es recibido como una interrupción en el proceso principal *wimax_mac*.

Decisión 2.1: Basado en el índice de flujo en de llegada, este paquete será identificado como un paquete proveniente de la capa *IP* en el proceso principal *wimax_mac*.

Acción 2.1: A continuación, el paquete se pasa a través de una función de clasificación. La *CID* de la conexión más apropiada para controlar el paquete está identificada. Se asume para este caso, que es una conexión tipo *rtPS*.

Acción 2.2: Basado en la *CID*, el paquete es dirigido a el elemento encolador de conexiones tipo *CID*. Luego el paquete es encolado en una cola de datos.

Acción 2.3: Si el *ARQ* no está activado, una petición de ancho de banda es generada de manera inmediata para los nuevos paquetes en cola. De otra manera, si el *ARQ* estuviese activado, una petición de ancho de banda solo sería

establecida una vez que el paquete entra en la ventana sostenida por el ARQ sobre la cola de datos.

Acción 2.4: En cada caso, se requiere de peticiones de ancho de banda para el envío de datos. En conexiones tipo *rtPS* y *nrtPS* existirá una cola para diferentes solicitudes ancho de banda para cada conexión. Esto es consecuencia de que tanto *rtPS* como *nrtPS* realizan solicitudes de los recursos disponibles en el canal. En cada solicitud, existe una manera de proveer el ancho de banda requerido para una conexión específica. Esto implica, que las peticiones de ancho de banda para *rtPS* y *nrtPS* se encuentran separadas en cada conexión.

Para las conexiones tipo *BE*, solo existe una petición de ancho de banda que cubre a todas las conexiones de este tipo.

Evento 2.2: La solicitud es direccionada hacia la cola de petición de ancho de banda. Si esta petición de ancho de banda esta de primera en la cola, esta será enviada a al nodo *BS*. Si la petición de ancho de banda está precedida por otras peticiones de ancho de banda, tendrá que esperar varios turnos hasta que el suyo llegue.

Acción 2.5: La petición de ancho de banda es enviada al nodo *BS*.

Evento 2.3: El nodo *BS* recibe la petición de ancho de banda.

Acción 2.6: Una vez el nodo *BS* recibe la petición de ancho de banda, este se unirá con el flujo de servicio y también extraerá el tamaño del ancho de banda requerido (en *bits*) del paquete de petición. Las dos partes de información (apuntador de flujo de servicios, tamaño del ancho de banda requerido), son unidas en un proceso tipo *argmem* para luego ser transferido al proceso derivado *wimax_bs_control* mediante un llamado directo.

Acción 2.7: Invocar proceso derivado *wimax_bs_control*.

Evento 2.4: El proceso derivado *wimax_bs_control* es llamado.

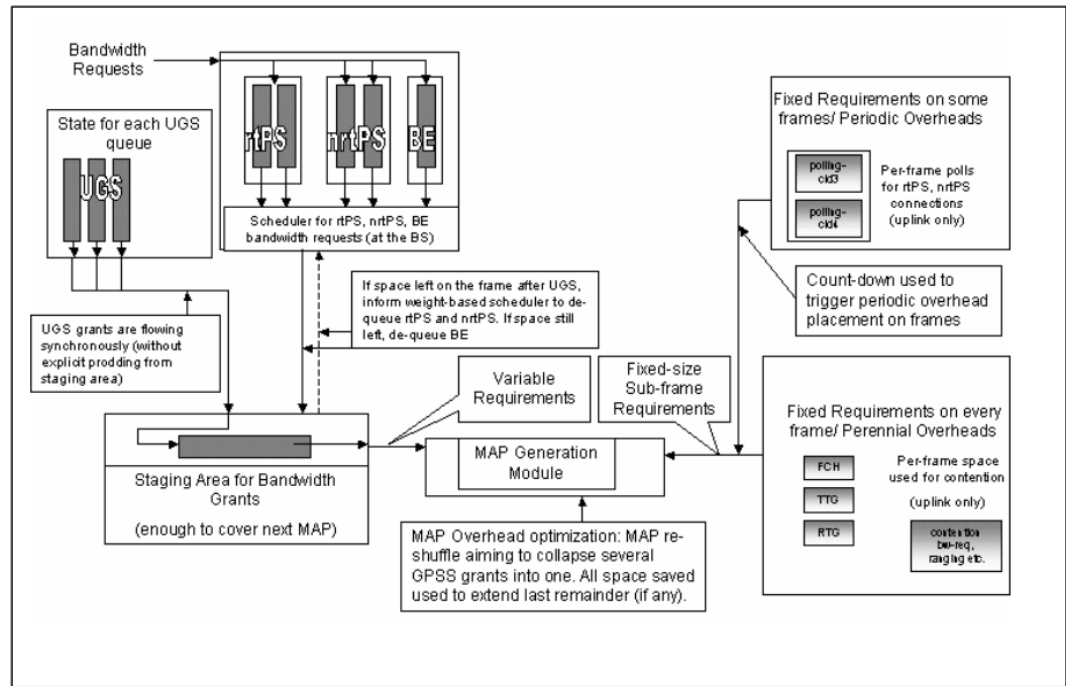
Decisión 2.2: El proceso derivado *wimax_bs_control* ahora puede reconocer desde el proceso *argmem* que está siendo llamado por una petición remota de ancho de banda para una determinada conexión.

Acción 2.8: La petición de ancho de banda, será direccionada a la cola asociada al flujo de servicio. A medida que la petición ancho de banda esta lista para ser encolada, esta es llevada a una estructura de datos intermedia llamada *WimaxT_Request_Element*. Con la anterior suposición, el elemento requerido terminará en una cola tipo *rtPS* en el planificador de solicitudes.

Evento 2.5: Es tiempo crear un *MAP* en el nodo *BS*. El proceso derivado *wimax_bs_control* reconocerá la creación del *MAP* como una interrupción (mediante un procedimiento de llamado).

Considérese en el Evento 2.5 más detalladamente. La vista de alto nivel del *MAP Generator* es mostrada en la figura 108. En la Acción 2.8, el paquete de petición de ancho de banda para *rtPS* ha sido llevado a un elemento de petición (una estructura de datos que contiene toda la información necesaria para realizar esta concesión). El elemento solicitado ha sido encolado en una de las colas de conexión *rtPS* en el cuadro de la esquina superior izquierda de la figura 108. Esta situación ocurre en el Evento 2.5.

Figura 108. Esquemático del *MAP Generator*



Fuente: [34]

Una vez ocurre el Evento 2.5, los elementos solicitados de las conexiones *rtPS*, *nrtPS* y *BE* son removidos de las colas basados en una disciplina de encolamiento (por ejemplo *WFQ*, *MDRR*).

Acción 2.9: Basado en la decisión del planificador, (por ejemplo *WFQ*, *MDRR*), los elementos solicitados son drenados por colas de conexión y transformados en solicitudes. El proceso de drenaje de los elementos de solicitud de las colas *rtPS*, *nrtPS* y *BE* ocurre periódicamente siempre que los *MAP* estén disponibles.

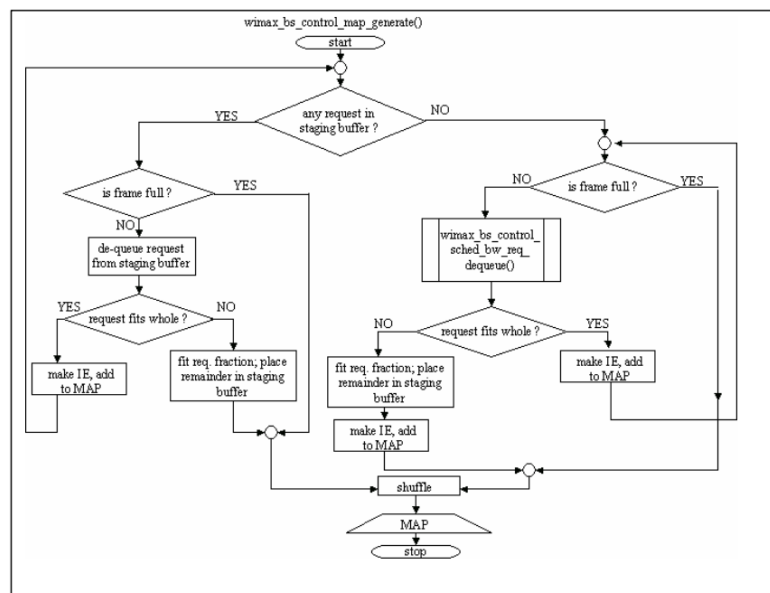
Acción 2.10: El ancho de banda solicitado es movido a un buffer temporal. Este movimiento ocurre solo si hay espacio disponible en esquema actual. Si hay espacio para alojar en su totalidad el elemento requerido, entonces un *IE* es creado. El *IE* es insertado en la lista de *Information Elements* transportados por *MAP*. Si no hay espacio disponible para alojar el elemento solicitado (pero al

menos hay suficiente espacio para alojar la cabecera del paquete *MAC*), entonces los elementos solicitados se dividirán en dos partes de manera que la suma de los tamaños de estas dos partes sea igual al tamaño de la parte original. La otra solicitud (un recordatorio del original) es dejado en el *buffer* temporal para ser alojado en el próximo *MAP*.

Acción 2.11: Crear el IE e insertarlo en el MAP.

Acción 2.12: Una vez el MAP es formado, se guarda en una variable global.

Figura 109. Algoritmo del *MAP Generation*



Fuente: [34]

Acción 2.13: Se emite un apuntador al MAP en paquetes con dirección a todos los nodos SS en el sector. De esta manera, el MAP llegará al proceso principal del nodo SS mediante una interrupción de secuencia.

Evento 2.6: Interrupción de secuencia en el nodo SS.

Decisión 2.3: El paquete *MAP* será reconocido como un paquete de control.

Acción 2.14: Se llama el proceso derivado *wimax_ss_control*; se pasan los mensajes *MAP* al *argmem*.

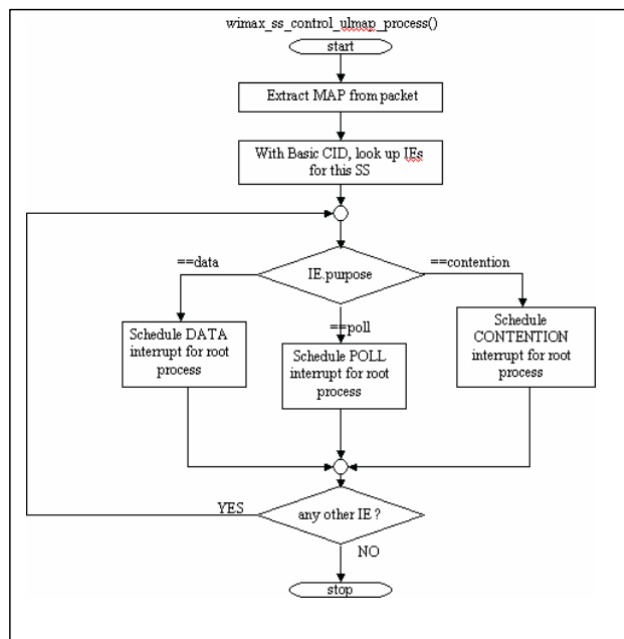
Evento 2.7: El proceso derivado *wimax_ss_control* es llamado.

Decisión 2.4: El proceso derivado *wimax_bs_control* es capaz de reconocer desde el proceso *argmem* que está siendo invocado por un *MAP*.

Acción 2.15: Se extrae el apuntador *MAP* desde el paquete (y se destruye el paquete)

Acción 2.16: Realizar una búsqueda rápida mediante *Basic CID* para identificar todas las asignaciones en el *MAP* (ráfagas de datos) que son de interés para la capa *MAC*. Esto hace parte de la función *wimax_ss_control_ulmap_process ()*.

Figura 110. Proceso de decodificación del UL-MAP en el nodo SS



Fuente: [34]

Acción 2.17: Los permisos de *per-Basic CID* serán orientados hacia el planificador *GPSS* el cual los descompone en permisos *per-CID*.

Acción 2.18: Para cada solicitud *per-CID*, se crea una interrupción para el proceso principal *wimax_mac*, que es entregado en el límite de tiempo cuando la solicitud inicia.

Evento 2.8: El proceso *wimax_mac* recibe la interrupción, indicando una solicitud. La interrupción indica una solicitud, que puede ser de manera alternativa entregada en el límite de tiempo cuando el permiso finaliza. Esto, puede ser requerido, porque no existen proyecciones y modelamientos de propagación de retardos. Los paquetes son entregados de manera instantánea en el otro extremo.

Decisión 2.5: El proceso *wimax_mac* control ahora es capaz de reconocer el código de interrupción que no es más que una interrupción de la solicitud. El estado de acontecimiento asociado con esta interrupción generará una información adicional acerca de la interrupción (como será asignada la transferencia de información, en cuanto tiempo y con qué frecuencia, como se controlarán los permisos con que la información es transmitida).

Acción 2.19: El proceso *wimax_mac* dirige la interrupción al *CID*.

Acción 2.20: La información es transmitida dentro de los límites de tiempo y frecuencia determinados previamente en el *CID*.

Así concluye la secuencia operacional, ya que ahora, el paquete que originó la solicitud de reserva de ancho de banda fue enviado dentro de los parámetros de tiempo estipulados en la solicitud.

La última acción, *Acción 2.20*, merece más detalle. Hasta ahora el *WiMAX Model* no posee escenarios de proyección. Por consiguiente, enviar el paquete dentro de los parámetros de tiempo y frecuencia estipulados en la solicitud necesita ser explicado. El mecanismo para enviar queda de manera instantánea entregado en el otro extremo de la red. Para un modelamiento más real, se entregará el paquete (de manera instantánea), en el límite de tiempo solicitado en la petición.

Esta secuencia operacional, opera de manera similar para conexiones tipo *nrtPS* y *BE*. La diferencia más notable, ocurre en la petición de reserva de ancho de banda. Para *rtPS*, la petición de ancho de banda es enviada desde una cola de solicitudes de ancho de banda de una conexión tipo *rtPS*, siempre y cuando una petición sea anunciada a la conexión *rtPS*. En el otro extremo, para *BE*, no existen peticiones. Además, todas las peticiones tipo *BE*, se acumulan en una sola cola dentro de la capa *SS MAC*. Las solicitudes de ancho de banda para aplicaciones *BE* solo serán usadas en intervalos de contención.

La secuencia operacional que describe la transferencia de un paquete *SDU* desde el nodo *SS* hasta el nodo *BS*, fue descrita con anterioridad. En la dirección contraria, que va desde el nodo *BS* hasta el nodo *SS* surgen algunas diferencias descritas a continuación. El proceso del encolamiento de un paquete *SDU*, en la cola del lado del nodo *BS*, cuando el *ARQ* no está habilitado, el proceso derivado será llamado de manera local tan pronto como sea posible. Una vez el *DL-MAP* es creado en el proceso *wimax_bs_control*, será transferido al proceso principal del *BS MAC*, bajo la apariencia de una interrupción. Al mismo tiempo, la interrupción a causa de la solicitud, se planificará para las diferentes colas de datos de *BS MAC*. No habrá interrupciones por sondeos o interrupciones en el *Down Link (DL)*. Finalmente, la interrupción de la solicitud, guiará a la transferencia del paquete de la conexión que envió la petición de ancho de banda.

SOLICITUDES Y TRANSFERENCIA DE DATOS PARA CONEXIONES TIPO UGS

Las conexiones tipo *UGS* funcionan de manera diferente en términos de solicitudes, en comparación con *rtPS*, *nrtPS* y *BE*. No existen solicitudes de ancho de banda para conexiones tipo *UGS*. Por consiguiente, las conexiones *UGS* deben tener una infraestructura en el planificador en el nodo *BS* con el objetivo de proveer recursos permanentes a las solicitudes.

Para ese efecto, en la admisión de un flujo *UGS*, el control de admisión le avisará al planificador de la *BS* que agregue un estado para las conexiones *UGS*. Este estado de las conexiones se asocia al *WimaxT_UGS_Request_Injector*. Cada *WimaxT_UGS_Request_Injector* planificará un procedimiento de llamado a interrupción. El procedimiento de llamado a interrupción ingresará un elemento de solicitud de tamaño similar a un paquete *SDU* en el *buffer* temporal. El *buffer* temporal funciona bajo el principio *FIFO*, de modo que las solicitudes de las conexiones *UGS* llegaran primero que las solicitudes *rtPS*, *nrtPS* y *BE* que son reasignadas durante el evento *MAP*.

La inserción periódica de solicitudes en el *buffer* temporal, es implementada en los enlaces *UL* y *DL* para las conexiones tipo *UGS*.

Evento 3.1: Procedimiento de llamado a interrupción para *wimax_bs_control_ugs_request_inject ()*. Como parte del llamado, se realiza una solicitud *UGS* y se inserta en el *buffer* temporal (*FIFO*).

Evento 3.2: Generación del evento *MAP*.

Acción 3.1: Durante la generación del paquete *MAP*, se extrae el elemento de solicitud del *buffer* temporal.

Entrega de *MAP*

La entrega del paquete *MAP* desde el nodo *BS* al nodo *SS* ocurre de manera periódica y está situado al inicio de cada trama. Después de que el *MAP* es creado, el nodo *BS* lo almacena en una locación central, de donde puede ser rápidamente requerido por un identificador del nodo *BS*. Luego este paquete se envía al nodo *SS* junto con un apuntador hacia la estructura *MAP*. El nodo *SS* recibe este paquete y lo decodifica.

Cuando el próximo *MAP* se requiere, el nodo *BS* genera un nuevo *MAP* y reemplaza el anterior *MAP* con los nuevos valores. Este enfoque es suficiente, ya que permite almacenar el *MAP* en una estructura de datos que no requiere copias.

DESCRIPCIÓN DEL *PROCESS MODEL*

En esta sección, se hablara de la funcionalidad del *process model*. Se inicia con el proceso *wimax_mac*. Este proceso contiene las funcionalidades comunes de los nodos *BS* y *SS*. El siguiente estímulo se recibe en el proceso *wimax_mac*.

Estímulo 1.1: Un paquete procedente de la capa *IP*. Este estímulo puede suceder tanto en el nodo *BS* y el nodo *SS*. Este estímulo es identificado por la ocurrencia de una interrupción del flujo proveniente de la capa *IP*.

Las siguientes funciones son llamadas en respuesta al estímulo:

1. *Wimax_mac_higher_layer_packet_classify ()*
2. *Wimax_mac_higher_layer_packet_enqueued ()*

Estimulo 1.2: Un paquete procedente de la capa *PHY*. Este estimulo puede ocurrir tanto en el nodo *BS* y el nodo *SS*. Este estimulo es identificado por la ocurrencia de una interrupción del flujo proveniente del receptor y adicionalmente estableciendo un campo de datos entero dentro del paquete. La siguiente función se llama en respuesta a este estimulo: *wimax_mac_lower_layer_packet_process ()*.

Estimulo 1.3: Un *UL-MAP* proveniente de la capa *PHY*. Este estimulo solo ocurre en el nodo *SS*. El *UL-MAP* se entrega por medio de un paquete a todos los nodos *SS*. Dado que no hay soporte para difusión (*broadcasting*) en este modelo *WiMAX*, la distribución de los paquetes se efectúa, haciendo copias del mismo paquete y enviándoselas a cada nodo *BS*. Cada paquete es identificado como un paquete *MAP*. Este estimulo es identificado por la incidencia de una interrupción y por los campos de identificación dentro del paquete. Este esquema es entregado al proceso derivado por medio de un llamado que contiene un identificador en el *argmem* que es pasado del proceso principal al proceso derivado.

Estimulo 1.4: Una petición de ancho de banda proveniente de la capa *PHY*. Este estimulo solo ocurre en el nodo *BS*. Este estimulo identificado por la incidencia de una interrupción en el flujo de datos proveniente del receptor. Las siguientes funciones son llamadas en respuesta a este estimulo:

1. *wimax_mac_control_packet_process ()*
2. *wimax_mac_bw_request_packet_process ()*

Estimulo 1.5: Un mensaje de control llega de la capa *PHY*. Este estimulo sucede tanto en la estación base como en la estación suscriptora (estación móvil). Este estimulo es identificado por el acontecimiento de una interrupción en el flujo de

datos proveniente del receptor. La siguiente función es llamada en respuesta a este estímulo:

1. *wimax_mac_bw_request_packet_process ()*

Ahora se describe el estímulo que se recibe en el proceso derivado *wimax_bs_control*. Este proceso derivado contiene la característica de que es solo existe en el nodo *BS* (comúnmente, en el plano de control).

Estímulo 2.1: Una solicitud remota para ancho de banda proveniente del proceso principal. Este estímulo es identificado mediante el modo de invocación (a través de la función *op_pro_invoke()*) y por el valor del campo (usualmente entero) del *argmem* que pasa al proceso derivado *wimax_bs_control*. La siguiente función es llamada en respuesta a este estímulo:

1. *wimax_bs_control_sched_bw_req_notify()*

Estímulo 2.2: Una solicitud local proveniente de un proceso principal. Es el mismo procedimiento que el realizado por una solicitud de ancho de banda remota.

Estímulo 2.3: Un mensaje de control proveniente de un proceso principal. Este estímulo es identificado mediante el llamado (a través de la función *op_pro_invoke()*) y por el valor del campo (usualmente entero) del *argmem* que pasa al proceso derivado *wimax_bs_control*. La siguiente función es llamada en respuesta a este estímulo:

1. *wimax_bs_control_packet_process ()*
 - a. *wimax_bs_control_dsa_packet_process ()*

- b. <<Las funciones para otros paquetes de control van en este espacio>>

Estimulo 2.4: Generación temporizador de un paquete *MAP*. Este estímulo es identificado mediante el llamado (a través de la función *op_intrpt_schedule_self ()*), y del valor del código de interrupción. Las siguientes funciones son llamadas en respuesta a este estímulo:

1. *wimax_bs_control_map_generate ()*

La función *wimax_bs_control_map_generate ()* funciona como en la Figura 108.

En la figura 108, se puede notar que la función *wimax_bs_control_sched_bw_req_dequeue ()* no le da prioridad a las colas tipo *rtPS*, *nrtPS* y *BE*. Por otro lado, el *buffer* preserva el valor anterior del *MAP*, al mismo tiempo mantiene las solicitudes provenientes de conexiones *UGS* que son alojadas en el paquete *MAP* con prioridad antes de cualquier elemento de conexiones tipo *rtPS*, *nrtPS* y *BE*.

La funcionalidad del *IE* en la figura 109 puede que funcione diferente bajo características de *SC (Single Carrier)* u *OFDMA PHY*. Sin embargo, básicamente se basará en el mismo prototipo, independiente de *PHY*.

La función *wimax_bs_control_IE_make ()* tiene las siguientes entradas:

1. *request_elem_ptr*, indicador de la solicitud del elemento requerido para ser servido.
2. *map_ptr*, indicando al *MAP*.
3. *phy_type*, posee dos valores: *SC* y *OFDMA*

La función *wimax_bs_control_IE_make ()* posee las siguientes salidas:

1. *ie_ptr*, un apuntador al recién formado *IE*.
2. *remain_request_element_ptr*, indicador a las solicitudes no tenidas en cuenta, si el elemento inicial no pudo ser parcialmente alojado.

En los modos de operación *Single Carrier* y *OFMDA*, los llamados se harán a la función *wimax_bs_control_IE_make ()*.

Estimulo 3.1: Un mensaje de control proveniente del proceso principal.

Este estímulo es identificado mediante el llamado (a través de la función *op_pro_invoke ()*) y por el valor del campo (usualmente entero) del *argmem* que pasa al proceso derivado *wimax_bs_control*. Las siguientes funciones son llamadas en respuesta a este estímulo:

1. *wimax_bs_control_packet_process ()*
 - a. *wimax_bs_control_dsa_packet_process ()*
 - b. *wimax_ss_control_ulmap_process ()*

Para una instancia de estímulo dada, solo una de las funciones *wimax_ss_control_dsa_packet_process ()*, *wimax_ss_control_ulmap_process ()* es llamada. La decisión de de llamar una función u otra depende del campo dentro del paquete identificador transmitido como parte del *argmem*. La función *wimax_ss_control_dsa_packet_process ()* es implementada para el procesar paquetes tipo *DSA-RSP*. La función *wimax_ss_control_ulmap_process ()* procesa el *MAP* y planifica las interrupciones para el proceso principal basado en las siguientes razones:

Realiza interrupciones para iniciar la transmisión de datos, para iniciar el intervalo de tiempo y para solicitar ciertas conexiones (*rtPS* ó *nrtPS*). En la figura 110. se describe el algoritmo para la decodificación del *MAP*. El *Information Element* del *UL-MAP* será recuperado de la llave *hash* que ha sido

establecida para una búsqueda rápida mediante el *CID*. La búsqueda es realizada por *Basic CID*. Algunos *IE* pueden ser recuperados por el *Basic CID* (para diferentes propósitos: información, petición o contención).

Ahora se describe los medios por los cuales los controles de proceso de los nodos *SS* y *BS* influyen el proceso principal (que contiene el plano de datos). Las maneras en las cuales el control de procesos controla el plano de datos son descritas a continuación.

En el nodo *SS* el proceso derivado *wimax_ss_control* influye en el proceso principal a través de los siguientes mecanismos.

Estimulo 4.1: Una interrupción de datos llega al proceso *wimax_mac*. Este estímulo es identificado mediante el modo directo de llamado (mediante *op_intrpt_schedule_process ()*) y mediante el código de interrupción. El evento de estado que es entregado con esta interrupción transportará información (como los datos del *CID*). La solicitud debe ser asociada a un dato del *CID* específico. El permiso será direccionado hacia el elemento formador de la cola que corresponde al *CID*. Resultará en la transferencia de un *MAC-PDU* el cual se representa como carga en *PHY*, que será del tamaño del paquete de permiso o más pequeño.

Estimulo 4.2: Una interrupción de solicitud llega al proceso *wimax_mac*. Este estímulo es identificado mediante el modo directo de llamado (mediante *op_intrpt_schedule_process ()*) y mediante el código de interrupción. El evento de estado que es entregado con esta interrupción transportará información de la solicitud. Los resultados de la solicitud repercutirán en la transferencia inmediata de los requerimientos de ancho de banda requerida del *CID* mencionado.

Estimulo 4.3: Una solicitud de interrupción llega al proceso *wimax_mac*. Este estímulo es identificado mediante el modo directo de llamado (mediante

op_intrpt_schedule_process ()) y mediante el código de interrupción. El evento de estado que es entregado con esta interrupción transferirá esta solicitud.

Estimulo 4.4: Estructuras modificadas del plano de datos. Este estímulo no es una interrupción. En lugar de eso, el plano de control tiene acceso completo a sus estructuras (tales como clasificadores, colas, etc.), y puede modificarlas como desee por medio de los mensajes de control.

En el lado del nodo *BS*, el estímulo 4.1 y 4.4 son relacionados, obteniendo los mismos efectos como sucede en el nodo *SS*. Además de eso, el plano de control posee una interrupción para dar el *MAP* recientemente construido al plano de datos para el envío.

Estimulo 5.1: El plano de datos recibe la interrupción *MAP* proveniente del plano de control. Este estímulo es reconocido mediante el modo directo de llamado (mediante *op_intrpt_schedule_process ()*) y por medio el código de interrupción. El evento de estado que es entregado con esta interrupción transferirá el *MAP*.

ORGANIZACIÓN INTERNA DE LOS DATOS

Esta sección describe la estructura de los datos en el sistema. Esto incluye, la relación entre los diferentes tipos de estructuras de datos usadas en cada contexto y los requerimientos de esos contextos, de manera que se pueda entender como la selección particular de los datos se lleva a cabo. En el futuro, nuevos requerimientos puede dar lugar a diferentes opciones.

Estructuras de Datos

Se necesitan las estructuras de datos por las siguientes razones:

1. Representación de los *MAP's*
 - a. Representación de los *Information Elements* dentro de un *MAP*.
2. Adición de tipos de eventos de estado que son asociados con las interrupciones *MAP* provenientes del nodo *BS* hasta el nodo *SS*.
3. Los datos del *argmem* para comunicación entre el proceso principal y los procesos derivado.
4. Implementación del bloque de funcionalidad *ARQ*.
5. Adición de los *buffers* de segmentación dentro del elemento de cola.
6. Adición de un *buffer* de re ensamblaje por cada *CID* en el receptor.

DESCRIPCIONES DE LOS DATOS

Estructura del Elemento de Información (*IE*)

Contexto

Los paquetes *MAP* contienen equipos de elementos de información. Un elemento de información describe la locación en tiempo (y frecuencia, para *OFDMA/OFDM*), del permiso asignado en la trama descrita por medio del *MAP*.

Formatos de Datos

A continuación se detalla en una tabla una estructura genérica *WimaxT_IE*, la cual contiene:

Tabla 27. *WimaxT_IE*

<i>WimaxT_IE</i>		
Miembro	Tipo	Comentario
<i>type</i>	<i>enum</i>	Uno de tres posibles.
<i>dimensions_ptr</i>	<i>void</i>	El “tipo” de miembro especifica como el tipo de <i>void</i> debe ser interpretado.
<i>cid</i>	<i>integer</i>	Es el <i>CID</i> con la cual cada trama se identifica.
<i>purpose</i>	<i>enum</i>	Una de tres: datos, sondeo, intervalo de contención.
<i>extra_info_ptr</i>	<i>void</i>	Información adicional introducida mediante la implementación de eficiencia.

Fuente: [34]

El tipo de “*dimensions_ptr*” que hace parte de *WimaxT_IE* es uno de las tres clases siguientes:

Tabla 28. *WimaxT_IE_Dim_Type1*

<i>WimaxT_IE_Dim_Type1</i> (para tramas tipo <i>SC</i>)		
Miembro	Tipo	Comentario
<i>start_symbol</i>	<i>Integer</i>	Inicia el control
<i>duration_symbols</i>	<i>Integer</i>	Duración en dada símbolos
<i>modulation_coding</i>	<i>Integer</i>	Referencia en cuanto a modulación y codificación.

Fuente: [34]

Tabla 29. *WimaxT_IE_Dim_Type2*

<i>WimaxT_IE_Dim_Type2</i> (para tramas tipo <i>OFDMA DL</i>)		
Miembro	Tipo	Comentario
<i>start_symbol</i>	<i>integer</i>	Inicia en tiempo
<i>start_subchannel</i>	<i>integer</i>	Inicia en frecuencia
<i>duration_symbols</i>	<i>integer</i>	Duración en tiempo
<i>width_subchannel</i>	<i>integer</i>	Ancho en frecuencia
<i>modulation_coding</i>	<i>integer</i>	Referencia en cuanto a modulación y codificación.

Fuente: [34]

Tabla 30. *WimaxT_IE_Dim_Type3*

<i>WimaxT_IE_Dim_Type3</i> (para tramas tipo <i>OFDMA UL</i>)		
Miembro	Tipo	Comentario
<i>start_symbol</i>	<i>integer</i>	Inicia en tiempo
<i>start_subchannel</i>	<i>integer</i>	Inicia en frecuencia
<i>duration_symbols</i>	<i>integer</i>	Duración en tiempo
<i>modulation_coding</i>	<i>integer</i>	Referencia en cuanto a modulación y codificación.

Fuente: [34]

La estructura de datos de *MAP* es *WimaxT_Map*.

Detalles de Información

Solo hay una estructura de datos para el *Information Element*. Las características de cada tipo de *PHY* son clasificadas en tres tipos para especificar las dimensiones de una trama definida mediante el *IE*. Por consiguiente, existen tres estructuras de datos para las dimensiones de las tramas: la primera es para *IE* describiendo tramas en *SC*, la segunda es para *IE* describiendo concesiones propias *OFDM*, y la tercera describe una concesión escalonada en *OFDMA*. Nótese que incluso en *OFDMA* se puede usar *WimaxT_IE_SC* para describir rectángulos de frecuencia tales como aéreas de contención.

ESTRUCTURAS DE DATOS *MAP*

Contexto

El *MAP* describe las asignaciones hechas en una trama.

Formatos de Datos

La estructura *WimaxT_Map* es mostrada a continuación. Una vez es generado, el *MAP* es almacenado en una locación central. La duplicación de información referente a *MAP* no es permitida por razones de capacidad de almacenamiento: para cada nodo *BS*, habrá solo una estructura de datos *MAP*.

Tabla 31. *WimaxT_Map*

<i>WimaxT_Map</i>		
Miembro	Tipo	Comentario
<i>type</i>	<i>enum</i>	DL o UL
<i>bs_id</i>	<i>integer</i>	Medios únicos para identificar el nodo <i>BS</i> .
<i>start_offset</i>	<i>double</i>	Inicia la compensación en tiempo desde el inicio de la trama.
<i>size_symbols</i>	<i>integer</i>	Tamaño de los símbolos, usados para modelar un paquete <i>MAP</i> .
<i>num_IE</i>	<i>integer</i>	Numero de <i>IE</i> en un <i>MAP</i> .
<i>ie_hash_ptr</i>	<i>PrgT_Hash</i>	Codigo hash de los <i>IE</i> para una búsqueda rápida del <i>CID</i> .

Fuente: [34]

Detalles de Información

Se requiere de una rápida capacidad basada en el *CID*, de modo que cada nodo *SS* pueda dirigir de manera eficiente en el *IE* de interés, desde todo el *MAP*. Para ese fin, se colocan los *IE* dentro del mapa y se asocian a un código hash codificado por el *CID*.

Paquete *MAP*

Contexto

Periódicamente, al inicio de cada trama, un paquete por cada nodo activo *SS* es formado en el nodo *BS*. Cada paquete transporta un indicador hacia la estructura

MAP mas reciente. Cuando el paquete es recibido en el nodo SS, el MAP es extraído y decodificado.

Formatos de Paquetes

Un nuevo formato de paquete es introducido: *wimax_mgmt_map*. Contiene los siguientes campos.

Tabla 32. *wimax_mgmt_map*

<i>wimax_mgmt_map</i> (campos del paquete)		
Miembro	Tipo	Comentario
<i>Header Type</i>	<i>integer, enum</i>	Indicación paquete
<i>Packet Role</i>	<i>enum</i>	Datos o control
<i>Map</i>	<i>structure</i>	Indicador de MAP.

Fuente: [34]

Detalles de Información

Los campos tipo de cabecera (*Header Type*) y la función del paquete (*Packet Role*) son usados para identificar este paquete como un paquete de control, y en particular, como un paquete MAP. El campo “Map” contiene un indicador hacia la estructura de datos *WimaxT_Map* que es creado por el nodo BS.

ARGMEM PARA LA COMUNICACIÓN PRINCIPAL-DERIVADO

Contexto

Existen varias llamadas tipo principal-derivado que ocurren entre el proceso principal *wimax_mac* y los procesos derivados *wimax_ss_control*, *wimax_bs_control*. La información es transferida desde el principal al derivado mediante

el parámetro del *argmem* denominado *op_pro_invoke* (). A continuación, se establece la estructura de la memoria del *argmem* en todos los casos de los llamados.

Formatos de Información

Los estímulos 2.1, 2.2, 2.3 cuyos llamados desde el proceso principal *wimax_mac* hasta el proceso derivado *wimax_bs_control* involucran la transferencia de un estado de la bandera de identificación del paquete. La función *WimaxT_Control_Argmem* es usada en este caso.

Tabla 33. *WimaxT_Control_Argmem*

<i>WimaxT_Control_Argmem</i>		
Miembro	Tipo	Comentario
<i>pkptr</i>	<i>Packet</i>	Paquete de control
<i>service_flow_ptr</i>	<i>WimaxT_Service_Flow</i>	Datos o control
<i>req_size</i>	<i>integer</i>	Petición del tamaño en bits

Fuente: [34]

El estímulo 3.1 proveniente del proceso principal *wimax_mac root* hacia el proceso derivado *wimax_ss_control* entrega un paquete *UL-MAP* o algún tipo de mensaje de control respectivamente. Por consiguiente, el proceso *WimaxT_Control_Argmem* puede ser utilizado para este fin, con la excepción que se ignora el miembro *req_size* porque el simple hecho que no hay solicitudes para ancho de banda hacia el proceso de control en el nodo SS.

Detalles de Información

Cuando una solicitud para ancho de banda (sea remota o local), pasa al proceso de control derivado en el nodo *BS*, los siguientes miembros del tipo *argmem* son

utilizados: *service_flow_ptr*, *req_size*. El miembro "*pkptr*" es inicializado en *OPC_NIL*, ya que la solicitud para ancho de banda no es transferida como si fuese un paquete. Esto implica el siguiente acercamiento para las solicitudes remotas para ancho de banda: estas son recibidas en el proceso principal, se identifica el correspondiente flujo de servicio y el valor de la solicitud es extraído. Los dos últimos son enviados al proceso derivado mediante *argmem*. El paquete de solicitud para ancho de banda es destruido en el proceso principal *wimax_mac*.

ANEXO B

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS NODOS BS Y MS EN WiMAX

Tabla 34. Especificaciones Técnicas del Nodo BS

System Capability	Nonline-of-sight operation, PMP deployment
RF Band	3.4-3.6 GHz, 3.6-3.8 GHz (FWA bands)
Centre Frequency Resolution	250 kHz
Frequency Stability	+ /-4 ppm
Channel Size	3.5, 7 MHz
RF Dynamic Range	>45 dB
Spectral Efficiency	Up to 5 bps/Hz (over-the-air)
Over the Air Rate	Up to 35 Mbps (7 MHz channel)
Latency	6-18 msec (depends on channel size, OFDM frame duration)
Maximu m Tx Power	+20 dBm
Rx Sensitivity	-96 dBm @ BPSK 1/2 (10 ⁻⁶ BER for 3.5 MHz channel)
Ethernet Cable	Maximu m length up to 75 m Multiplexed IF, DC power, control (Tx/Rx, AGC, APC)
Network Attributes	Transparent bridge, 802.1Q VLAN, 802.1p, network prioritization, DHCP, client pass-through
Modulation Coding Rates	Dynamic adaptive modulation (bi-directional) Auto-select modulation: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM Auto-select coding: 1/2, 2/3, 3/4
Over the Air Encryption	DES (traffic) and AES (key exchange)
MAC	Cell-based PMP deployment 802.16-2004 compliant PMP 802.16-2004 packet convergence sublayer mode TDMA Access Automatic repeat request (ARQ) error correction
Range	Over 3 km/2 miles nonline-of-sight Up to 20 km/12.4 miles line-of-sight
Duplex Technique	TDD (time division duplex) HD-FDD (half duplex frequency division duplex)
Wireless Transmission (PHY)	256 FFT OFDM
Network Connections	10/100 Ethernet (RJ-45)
System Configuration	HTTP (Web) interface, SNMP, CLI via Telnet
Network Management	SNMP, standard and proprietary MIBs, full management by RMS EMS
Power Requirements	PoE injector using 110/220/240 VAC 50/60 Hz Meets IEEE 802.3af PoE
Temperature Range	-40 °C to 60 °C
Wind Loading	Antenna: 137 mph/220 km/h
Physical Configuration	All outdoor units with indoor PoE optional IAD assembly
SU-O Dimensions	19 cm × 19 cm × 7 cm

Fuente: [21]

Tabla 35. Especificaciones Técnicas del Nodo MS

System Capability	Nonline-of-sight operation, PMP deployment
RF Band	3.4-3.6 GHz, 3.6-3.8 GHz (FWA bands)
Center Frequency Resolution	250 kHz
Frequency Stability	+ /-4 ppm
Channel Size	3.5, 7 MHz
RF Dynamic Range	>45 dB
Spectral Efficiency	Up to 5 bps/Hz (over-the-air)
Over the Air Rate	Up to 35 Mbps (7 MHz channel)
Latency	6-18 msec (depends on channel size, OFDM frame duration)
Maximum Tx Power	+23 dBm
Rx Sensitivity	-96 dBm @ BPSK 1/2 (10 ⁻⁶ BER for 3.5 MHz channel)
IF Cable	Maximum length up to 300 m Multiplexed IF, DC power, control (Tx/Rx, AGC, APC)
Network Attributes	Transparent bridge, 802.1Q VLAN, 802.1p, network prioritization, DHCP, client pass-through
Modulation Coding Rates	Dynamic adaptive modulation (bi-directional) Auto-select modulation: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM Auto-select coding: 1/2, 2/3, 3/4
Over the Air Encryption	DES and AES
MAC	Cell-based PMP deployment 802.16-2004 compliant PMP 802.16-2004 packet convergence sublayer mode
Range	TDMA Access Automatic repeat request (ARQ) error correction Over 3 km/2 miles nonline-of-sight Up to 20 km/12.4 miles line-of-sight
Duplex Technique	Dynamic TDD (time division duplex) HD-FDD (half duplex frequency division duplex)
Wireless Transmission (PHY)	256 FFT OFDM
Network Connections	TDM (RJ-48c), 10/100 Ethernet (RJ-45)
System Configuration	HTTP (Web) interface, SNMP, CLI via Telnet and Local Console
Network Management	SNMP, standard and proprietary MIBs, full management by RMS EMS
Power Requirements	Auto-sensing 110/220/240 VAC 50/60 Hz Auto-sensing 18-72 VDC, 75 W maximum
Temperature Range	IDU: 0°C-40 °C; ODU:-40 °C to 60 °C IDU Short-term: 0°C-55 °C for up to 5 h
Wind Loading	Antenna: 137 mph/220 km/h
Physical Configuration	AN-100U Terminal, Radio + Selection of antennas
IDU Dimensions	All interfaces on front panel 17" × 12" × 1.75"/431.8 mm × 304.8 mm × 44.45 mm

Fuente: [21]