



**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **PROYECTO FINAL DE CARRERA**

**TÍTULO DEL TFC:** Construcción de un modelo de nodo híbrido de red inalámbrica WiMAX - Red Óptica Pasiva (PON)

**TITULACIÓN:** Ingeniería técnica de telecomunicación, especialidad Telemática

**AUTORES:** Antonio González Gamero  
Carlos González Rojas

**DIRECTOR:** David Remondo

**FECHA:** 25 de junio de 2009



**Título: Construcción de un modelo de nodo híbrido de red inalámbrica WiMAX– Red Óptica Pasiva (PON)**

**Autor:** Antonio González Gamero  
Carlos González Rojas

**Director:** David Remondo

**Data:** 25 de junio de 2009

**Resumen**

Las redes inalámbricas WiMAX constituyen un importante avance en la tecnología de acceso a la red. Ésta, en conjunto con la red EPON, puede constituir una mejora de prestaciones y servicios de forma poco costosa para solucionar la demanda, en términos de anchos de banda, calidad de servicio, etc., que necesitan las nuevas aplicaciones, cada vez más exigentes.

En este proyecto nos centramos en el estudio de la combinación de la tecnología WiMax con las redes EPON. Para ello, utilizamos el simulador de redes OPNET, una herramienta que nos permite crear diferentes topologías de red y obtener resultados estadísticos del comportamiento de nuestra red, según el estándar IEEE 802.16e.

Primeramente, estudiamos las características de WiMAX. Después, utilizamos el entorno de simulación OPNET para implementar un nodo que soporta QoS entre WiMAX y EPON.. A partir de ello, creamos simulaciones y obtenemos resultados para poder hacer un análisis de si nuestra red se comporta como debería hacerlo.

En el proyecto hemos creado tres escenarios diferentes para verificar la funcionalidad básica del modelo.

**Title:** Construcción de un modelo de nodo híbrido de red inalámbrica WiMAX – Red Óptica Pasiva (PON)

**Author:** Antonio González Gamero  
Carlos González Rojas

**Director:** Dr. David Remondo

**Date:** June 25th, 2009

## Overview

WiMax wireless networks are an important advancement in the technology of network access. This technology allows a fast , cheap efficient access to network infrastructure. This, together with the EPON, can benefit services in an inexpensive way to address the users' demand in terms of bandwidth, QoS, etc. In this project, we focus on the study of the combination of WiMax technology with EPON networks. To do this, we use the network simulator OPNET, a tool that allows us to create different network topologies and to extract results of the statistical behavior of our network.

First, we analyze the characteristics of WiMax. Then, we use the OPNET simulation environment to implement a QoS-oriented network, from which we get results from which to analyze of whether the network is behaving as expected.

In the project, we created three different scenarios in order to assess the basic features of the QoS-oriented model implemented in WiMAX.

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1. REDES EPON.....</b>   | <b>11</b> |
| 1.1. Introducción.....   | 11        |
| 1.2. PON.....  | 11        |
| 1.3. EPON.....   | 12        |
| <b>CAPÍTULO 2. WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR<br/>MICROWAVE ACCESS (WIMAX).....</b>                | <b>14</b> |
| 2.1. La necesidad de transmisiones vía Wireless.....   | 14        |
| 2.2. WiMax.....  | 14        |
| 2.2.1. Subcapa MAC.....  | 16        |
| 2.2.2. Capa física.....  | 17        |
| 2.2.3. Subcapa de seguridad.....   | 18        |
| 2.2.4. Tipo de conexión.....   | 18        |
| 2.2.5. Clases de servicio.....   | 18        |
| 2.3. Porqué WiMax.....   | 19        |
| 2.4. WiMax vs WiFi.....  | 20        |
| 2.5. Evolución de la familia IEEE 802.16.....  | 21        |
| <b>CAPÍTULO 3. ENTORNO DEL SIMULADOR DE SISTEMAS DE<br/>COMUNICACIONES OPNET MODELER 14.5.....</b> | <b>22</b> |
| 3.1. Introducción.....   | 22        |
| 3.2. Que es OPNET.....   | 22        |
| 3.3. Cómo funciona OPNET.....  | 23        |
| 3.3.1. Network modeler.....  | 24        |
| 3.3.2. Node modeler.....   | 24        |
| 3.3.3. Process modeler.....  | 24        |

|  |               |
|--|---------------|
| <b>3.4. Fases para una simulación.....</b>                     | <b>25</b>     |
| <b>3.5. Partes de OPNET.....</b>                               | <b>25</b>     |
| 3.5.1. Project Editor.....                                     | 25            |
| 3.5.2. Node Editor.....  | 26            |
| 3.5.3. Process Model Editor.....                               | 26            |
| 3.5.4. Link Model Editor.....                                  | 26            |
| 3.5.5. Path Editor.....  | 26            |
| 3.5.6. Probe Editor.....                                       | 27            |
| 3.5.7. Simulation Sequence Editor.....                         | 27            |
| 3.5.8. Packet Format Editor.....                               | 27            |
| <br><b>CAPÍTULO 4. WIMAX EN OPNET.....</b>                     | <br><b>28</b> |
| 4.1. Características y limitaciones.....                       | 28            |
| 4.2. Node Models.....  | 29            |
| 4.3. Atributos de las estaciones base y suscriptores.....      | 32            |
| <br><b>CAPÍTULO 5. CREACIÓN DE UNA RED WIMAX EN OPNET.....</b> | <br><b>33</b> |
| 5.1. Crear la topología de red.....                            | 33            |
| 5.2. Configurar la movilidad de los nodos.....                 | 33            |
| 5.3. Añadir tráfico al modelo de red WiMax.....                | 33            |
| 5.4. Configurar los parámetros WiMax.....                      | 34            |
| 5.5. Analizar nuestra red WiMax.....                           | 38            |
| <br><b>CAPÍTULO 6. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ESCENARIOS.....</b>   | <br><b>39</b> |
| 6.1. Primer escenario.....                                     | 39            |
| 6.1.1. Configuración WiMax Profile.....                        | 40            |
| 6.1.2. Configuración del emisor.....                           | 40            |
| 6.1.3. Configuración de la estación base.....                  | 41            |
| 6.1.4. Asignar tráfico al emisor.....                          | 42            |
| 6.1.5. Recolección de estadísticas.....                        | 42            |

---

|  |               |
|--|---------------|
| <b>6.2. Segundo escenario.....</b>                             | <b>44</b>     |
| 6.2.1. Arquitectura de un suscriptor (SS).....                 | 44            |
| 6.2.2. Modificación de la capa MAC de la estación base (BS)... | 44            |
| 6.2.3. Diseño del nodo estación base.....                      | 44            |
| 6.2.4. Interfaz WiMax.....                                     | 45            |
| 6.2.5. Solución a implementar.....                             | 46            |
| 6.2.6. Creación del escenario.....                             | 47            |
| 6.2.7. Resultados.....   | 50            |
| 6.2.8. Conclusiones.....                                       | 52            |
| <br><b>6.3. Tercer escenario.....</b>                          | <br><b>53</b> |
| 6.3.1. Creación del nuevo escenario.....                       | 54            |
| 6.3.2. Resultados.....   | 59            |
| <br><b>CONCLUSIONES.....</b>                                   | <br><b>62</b> |
| <br><b>VALORACIÓN PERSONAL.....</b>                            | <br><b>63</b> |
| <br><b>BIBLIOGRAFIA.....</b>                                   | <br><b>64</b> |

## Introducción

Este proyecto está encuadrado en el proyecto específico Fi-Wi de la red de excelencia Euro-NF que propone la arquitectura Fi-Wi. Esta arquitectura se forma por la unión de diferentes tecnologías en diferentes puntos de la red:

- Red metropolitana: OBS.
- Red de acceso: PON.
- Red de última milla: WiMAX.

Esta arquitectura pretende solucionar varios de los principales problemas que existe en Internet: el cuello de botella que se crea al acceder a la red de acceso, el aumento de la demanda de eficiencia y ancho de banda de los usuarios, etc.

Las redes “*Optical busrt switching (OBS)*” o *conmutación óptica de ráfagas*, es una mezcla entre la conmutación óptica de circuitos y la de paquetes, se basa en no tener que hacer la conversión óptica- eléctrica en cada nodo de conmutación, para aprovechar así la capacidad que tienen las fibras ópticas en términos de ancho de banda, evitando los cuellos de botella en estos nodos. Con OBS se pretende mejorar el rendimiento de la red agregando varios paquetes, con una misma dirección destino, en una misma ráfaga.

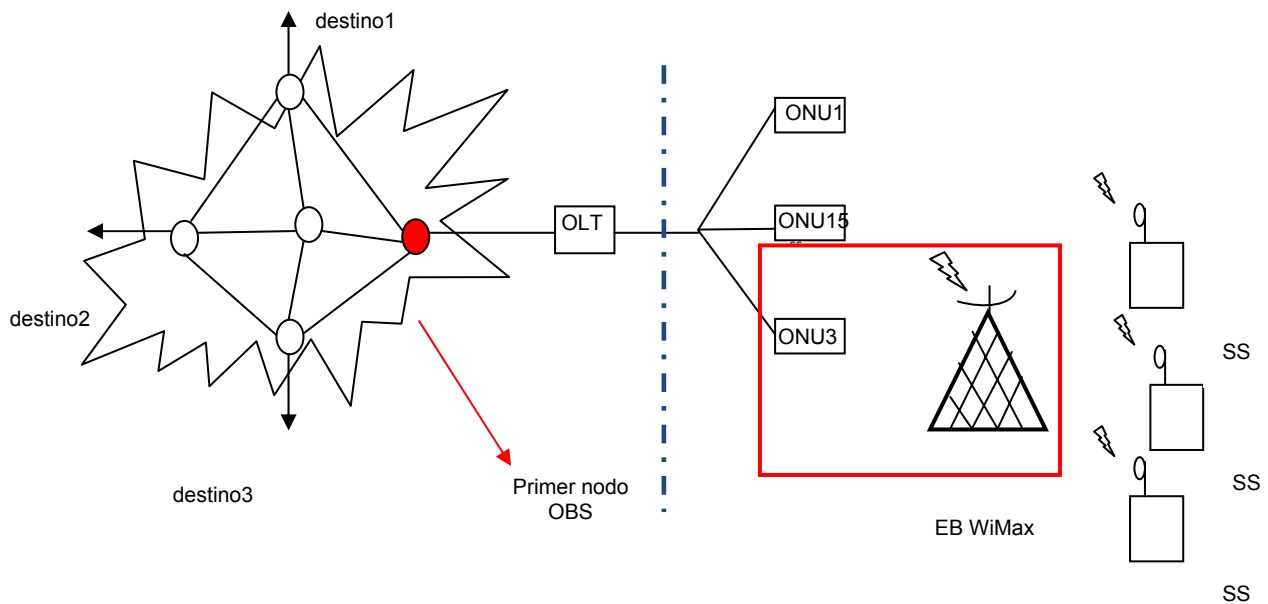
Las redes PON “Passive Optical Networks”, son redes de fibra que no necesitan elementos activos y son redes de fibra robustas y de fácil mantenimiento. Actualmente, el estándar se basan en TDM (multiplexación en el tiempo), pero la capacidad por usuario puede aumentar utilizando WDM (multiplexación por longitud de onda).

Por último las redes WiMAX son redes inalámbricas con características que mejoran las prestaciones de las redes actuales de acceso, con mayores anchos de banda, cobertura, etc.

Nos centraremos en el estudio de redes PONs y WiMax, haciendo posible la conexión de redes ópticas con estaciones base WiMax. Nuestro objetivo es integrar la rapidez y las características que ofrece WiMax con las ofrecidas por una red OBS.



Nuestra arquitectura de red es la siguiente:



**Fig.1.** Esquema arquitectura de red

La red OBS se conecta a la OLT, la cual puede recibir tráfico de hasta 32 ONUs. En nuestro sistema a simular, nuestra ONU se conectará a una estación base WiMax, como indicamos en el recuadro. A la estación base se le conectarán terminales, que podrían ser móviles o fijas. Para nuestro estudio no tendremos en cuenta la movilidad.

Para el tráfico de subida, el primer nodo OBS formará ráfagas con paquetes que tienen un destino común. En nuestro caso serán tres destinos. La red OBS es muy potente y rápida, pero para transmitir una ráfaga hay que hacer negociaciones previamente, lo cual introduce retardo y jitter en la red.

Para una combinación eficiente de WiMax, EPON y OBS, hay que tener en cuenta estos valores de jitter, para ofrecer servicios que requieren tasas constantes, como VoIP o videoconferencia. Lo que haremos será que el tráfico que recibe la OLT vaya al mismo destino y tenga la misma calidad de servicio asociada a un CID, de forma que tal y como lo reciba lo transfiera al nodo OBS y se llene rápidamente la cola con el destino OBS seleccionado. Una vez se haya llenado la cola, se enviará el tráfico hacia la red OBS.

Nuestra parte del proyecto se centra en simular un nodo híbrido que integre una estación base WiMax con una ONU EPON. Para simular este escenario utilizaremos el software de simulación OPNET.

OPNET tiene implementados, como veremos más adelante, estaciones WiMax, el comportamiento según las especificaciones del estándar 802.16e, clientes, etc.

Nuestro objetivo será utilizar estas herramientas para simular un nodo híbrido que entregue tráfico dividido en distintos destinos (nodos OBS) y con distintas prioridades de tráfico a la ONU.

A partir de estas simulaciones, pretendemos observar si la integración de estas tecnologías nos ofrece unas cualidades de jitter, retardos, etc., que resuelvan las necesidades ofertadas para todo tipo de servicios.

## **CAPITULO 1. Redes EPON**

### **1.1.- Introducción**

La variedad de servicios de comunicaciones ofrecidos a usuarios finales se ha expandido drásticamente en la última década. Los consumidores no están solo interesados en servicios de telefonía, televisión y radio; si no que se interesan por servicios que necesitan mayor calidad y velocidad en las comunicaciones: videos multimedia, transferencias de archivos P2P más rápidas, mayor definición de juegos on-line, etc. También se podrían solucionar diferentes problemas con mejores conexiones y ofrecer nuevos servicios como telemedicina, pudiendo hacer observaciones a través de conexiones de video, cosa que disminuiría el volumen de personas que colapsan hospitales; o por ejemplo, el teletrabajo, cosa que reduciría el tráfico en horas punta y todo lo que ello conlleva.

Las infraestructuras convencionales de telecomunicaciones basadas en el par de cobre y en cable coaxial no permiten solucionar todos estos retos, ya que no tienen capacidades para ofrecer servicios a la velocidad y calidad requeridas.

Las propiedades únicas de la fibra óptica, como las bajas pérdidas y el gran ancho de banda, las convierten en el candidato ideal para superar los retos mencionados anteriormente.

Los costes económicos son factores clave a la hora de escoger el proceso para introducir la fibra en las redes metropolitanas y de acceso.

### **1.2.-PON**

Las redes PON (Red óptica pasiva) son redes de fibra diseñadas para formar parte, dentro de la infraestructura de redes metropolitanas, de la conocida como la “última milla”. Estas son las que llevan los servicios de telecomunicaciones de voz y datos hasta los usuarios finales (hogares).

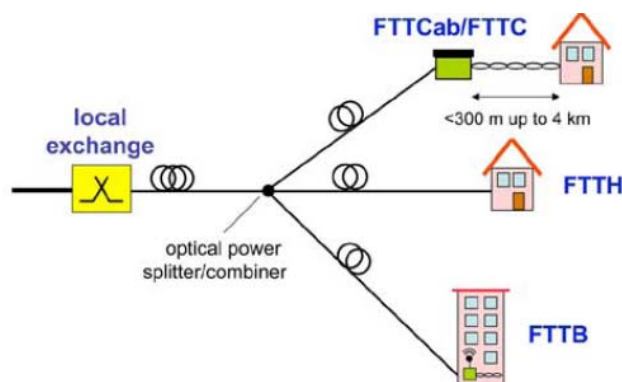
Este tipo de redes ofrecen varias ventajas frente a la red actual basada en el par de cobre:

- se aumenta la cobertura hasta 20 Km. desde la central, mejorando los 5'5 Km. que permite el par de cobre.
- Mayor ancho de banda para el usuario.
- Inmunidad ante ruidos electromagnéticos.

Estas redes sustituyen los equipos de servidor del proveedor de telecomunicaciones y del cliente por equipos de fibra. A través del Splitter, un dispositivo divisor óptico, se divide la energía de manera equitativa entre las fibras de salida

Las redes ópticas pasivas están formadas principalmente por cuatro elementos:

- OLT: Unidad óptica terminal de línea, situada como punto final de la red, donde se conecta a la red metropolitana.
- Un divisor óptico (Splitter), envía el tráfico desde la OLT a los diferentes destinatarios.
- Varias ONUS, unidades óptica de usuario, ubicadas en el extremo final, de cliente.
- Fibra óptica, medio por el que se transporta el tráfico.



**Fig.1.1.** Topología de red de acceso EPON

El tráfico viaja a través de esta red entre la OLT y las distintas ONUs que se comunican a través del Splitter en canal ascendente en una comunicación bidireccional. Esto conlleva que se utilicen diferentes métodos de multiplexado. También la potencia de la señal entre el sentido ascendente y el descendente es diferente, ya que en sentido descendente ha de ser potente para llegar a todos los usuarios, mientras que en sentido ascendente, ha de ser controlada para que no existan colisiones entre los distintos usuarios.

Las ONUs filtran el tráfico y envían a los usuarios solo el tráfico que va dirigido a él. El filtrado se hace a través de multiplexado del canal que diferencia el tráfico de usuarios por diferentes instantes de tiempo.

El canal ascendente, de la ONU a la OLT, se hace de forma que el canal se reparte por turnos entre los usuarios, existiendo diferentes tipos de acceso al medio (OCDMA, TDMA y SCMA y WDMA).

### 1.3.- Ethernet PON (EPON)

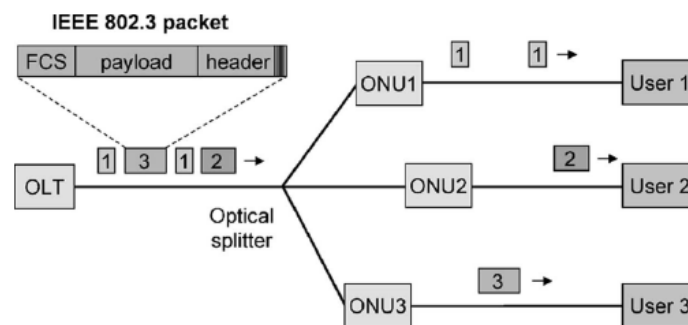
Debido a que la mayoría de redes se basan en IP y en Ethernet, se ha implementado Ethernet a través de este tipo de redes.

Los paquetes de este tipo de redes son de longitud variable, igual que sucede en las tramas Ethernet de las redes LAN convencionales.

Los paquetes se transportan a una velocidad de 1,25Gbps. El control de acceso al medio (MAC) se utiliza para el reparto del ancho de banda del canal.

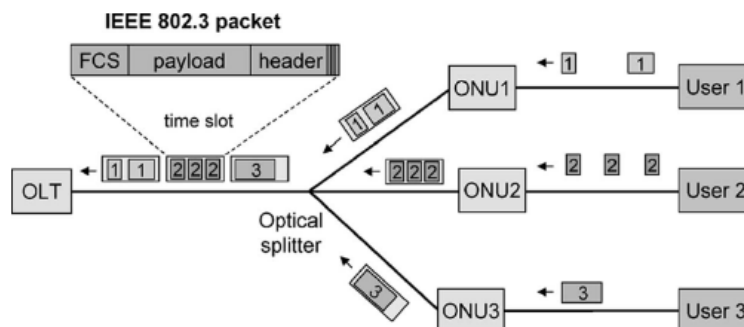
El tráfico de subida y de bajada se transporta utilizando diferentes longitudes de onda.

Los paquetes en el canal de bajada se envían de forma broadcast desde la OLT hacia todas las ONUs. Cada ONU lee las cabeceras de los paquetes y extrae solo el tráfico que va destinado a ellas.



**Fig.1.2.** Esquema de transferencia de paquetes en canal de bajada

En el canal de subida se utilizan subtramas de 2 ms, donde cada trama contiene ranuras de tiempo que se asignan a las distintas ONUs. Cada ONU coloca sus tramas dentro de su ranura. Si no hay tráfico para enviar, la ranura no se aprovecha, enviando una señal. La OLT permite enviar tráfico a las ONUs una por una. Cada ranura de ONU varía entre 125 y 250  $\mu$ s, aunque todavía no está estandarizado. Éstos pueden variar según la calidad de servicio que se le quiera dar a los distintos flujos de tráfico.



**Fig.1.3.** Esquema de transferencia de paquetes en canal de subida

## **CAPITULO 2. Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax)**

### **2.1. La necesidad de transmisiones inalámbricas**

Desde el final del siglo XX, se conoce el gran crecimiento de las redes de datos. Después de haber instalado conexiones fijas de Internet alrededor del planeta aun sigue su crecimiento; por ello que empieza a ver la necesidad de utilizar las conexiones inalámbricas como es el caso de WIFI o WIMAX.

Anteriormente a estas dos tecnologías apareció el GSM (Groupe Spécial Mobile), un estándar europeo, que permitía conexiones celulares digitales, denominadas de segunda generación (2G). Más tarde se evolucionó en GPRS (General Packet Radio Service), el cuál permitía velocidades entre los 56 y los 114kbps. Otra mejora es: EDGE (Enhanced Data Rates for GSM), considerada una tecnología 2,5G. A su vez por parte Europea y Japonesa se desarrollaba UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), ya de tercera generación.

A finales de los 90 apareció el estándar IEEE 802.11 para WLAN, conocido como tecnología WiFi. Éste podía cubrir áreas de 100 metros de radio con velocidades de hasta 54Mbps, aunque en el estándar 802.11g se habla de velocidades de hasta 108Mbps.

Más tarde apareció el estándar IEEE 802.15 que incluía las tecnologías Bluetooth y ZigBee que abastecían distancias mucho más cortas de hasta 20 metros con menores velocidades que WiFi.

No fue hasta mediados del 2002 que se publicó el primer estándar de WiMax, el IEEE 802.16, que podía dar cobertura mayor a 20 Km. según la banda de frecuencia. Ofrece velocidades de hasta 100Mbps.

### **2.2. WiMax**

*Worldwide Interoperability for Microwave Access* (interoperabilidad mundial para acceso por microondas) es una tecnología de acceso de banda ancha, considerada de última milla que trabaja con frecuencias de hasta 11GHZ. Aunque solo se consideran 2.5, 3.5 y 5.7GHz, las demás están por desarrollar.

Se caracteriza porque puede cubrir distancias de hasta 48km y velocidades de hasta 75Mbps. En visión directa (LOS) se obtienen 10Mbps en 10 Km. y en visión no directa (NLOS) 10Mbps en 2km si el terminal es estático. El rango de tasas es variable en función de la modulación y codificación de canal.

La siguiente tabla resume las principales características de esta tecnología inalámbrica, que se recogen en el estándar IEEE 802.16:

**Tabla 2.1.:** Características WiMAX

| <b>Característica</b>   | <b>Descripción</b>   |
|---|--|
| Antenas inteligentes  | Soporta mecanismos de mejora de eficacia espectral en redes inalámbricas y diversidad. de antenas  |
| Modulación OFDM<br>( Orthogonal Frequency Division Multiplexing)                            | Permite la transmisión simultánea de múltiples flujos de información en diversas frecuencias; usa espaciamiento ortogonal de las frecuencias para prevenir interferencias. |
| Sin línea de Vista (NLOS)   | No necesita línea de visión entre la antena y el suscriptor.   |
| Topología punto-multipunto y de malla (mesh)  | Soporta dos topologías de red, servicio de distribución multipunto y la malla para comunicación entre suscriptores.  |
| Calidad de servicio (QoS)   | Distingue los flujos y los agrupa en 5 clases de servicio, llamadas tipo de scheduler.   |
| FDM ( <i>Frequency Division Multiplexing</i> )<br>TDM ( <i>Time Division Multiplexing</i> ) | Tipos de multiplexado que soporta para propiciar la interoperabilidad con sistemas celulares (FDM) e Inalámbricos (TDM).   |
| Seguridad   | Incluye medidas de privacidad y criptografía inherentes en el protocolo.   |
| Bandas bajo licencia  | Opera en banda sin licencia - 2.4 GHz y 3.5 GHz para transmisiones externas en largas distancias   |
| Bandas libres (sin licencia)  | Opera en banda libre en 5.8, 8 y 10.5 GHz  |
| Canalización  | De 5 y 10 MHz  |
| Codificación  | Adaptativa   |
| Modulación  | Adaptativa   |
| Ecualización  | Adaptativa   |
| Potencia de Transmisión   | Controla la potencia de transmisión  |
| Acceso al Medio   | Mediante TDMA dinámico (en WiMax)  |
| Tamaño del paquete  | Negociación para cada flujo del tamaño del paquete   |
| Corrección de errores   | ARQ (retransmisión automática)   |
| Tasa de transmisión   | Hasta 75 Mbps  |

|                        |   |
|------------------------|---|
| Espectro de frecuencia | <ul style="list-style-type: none"> <li>• IEEE 802.16a entre 2-11 GHz (LOS) para comunicación entre antenas</li> <li>• IEEE 802.16b en 5-6 GHz con QoS             <ul style="list-style-type: none"> <li>• IEEE 802.16c en 10-66 GHz</li> </ul> </li> <li>• IEEE 802.16e en 2-6 GHz (NLOS) para distribución a suscriptores móviles.</li> </ul> |
| Alcance típico         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 Km. sin Línea de Vista</li> <li>• 4- 6 Km. en áreas de alta densidad demográfica</li> </ul>   |
| Aplicaciones           | Voz, vídeo y datos  |

En el estándar se define tanto la capa física (PHY) como la capa de control de acceso al medio (MAC). La capa MAC incluye mecanismos de convergencia entre subcapas y lleva la subcapa que se encarga de la seguridad

La subcapa de convergencia o también llamado mapeo de datos externos a la red, se recibe a través del punto de acceso al servicio. Esto incluye clasificaciones externas del servicio a proporcionar así como la asignación de un identificador a cada flujo de servicio, llamado CID. Estos flujos son flujos unidireccionales de paquetes con una QoS asignada en particular dentro de una lista de QoS como veremos más adelante.

### 2.2.1. Subcapa MAC

El protocolo está optimizado para configuraciones punto-multipunto donde varias estaciones luchan por acceder a una estación base (EB). También sería posible crear redes malladas (mesh), donde las estaciones tendrían comunicaciones directas.

La capa MAC, es orientada a conexión y centralizada, a cada servicio se le asocia una o más conexiones. Las estaciones solo compiten por el medio al entrar en la red. La Estación Base asigna un bloque (de tamaño variable en el tiempo) a cada conexión de acuerdo con un planificador que diferencia las diferentes conexiones.

Esta capa provee el acceso al sistema, el ancho de banda a proporcionar, el establecimiento de conexión y el mantenimiento de dicha conexión. La capa MAC recibe los datos de flujos de varios suscriptores (SSs) a los cuales se les asigna un CID. La capa MAC los clasifica según este identificador, que es único para cada conexión. Estos CID se asignan al suscriptor y cuando un flujo termina se le desasocia dicho CID para poder ser reutilizado.

El sistema soporta una transmisión basada en trama, donde cada trama adopta una longitud fija. Cada trama consiste en una subtrama de subida y otra



de bajada, donde la de bajada precede a la de subida. La de bajada consiste en una sola transmisión con un preámbulo utilizado para sincronización.

### 2.2.2. Capa física

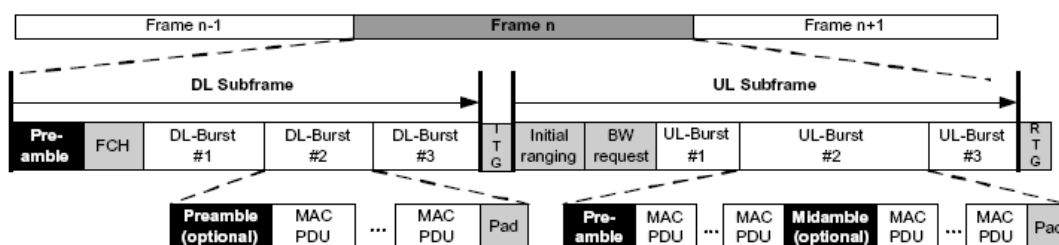


Fig. 2. IEEE 802.16 MAC frame in TDD mode.

### Fig. 2.1. Formato trama MAC WiMAX

En una topología punto-multipunto, la transmisión se hace a través de tramas con longitudes fijas cada cierto periodo de tiempo (5ms generalmente). Esta trama se divide en una subtrama de subida (DL) y otra de bajada (UL), donde cada una tiene diferentes tamaños. La de bajada es precedida por un preámbulo. Los tiempos de guarda van entre 0 y 100 us. Las estaciones base utilizan una parte variable de la subcapa de bajada para transmitir las PDU MAC a las diferentes terminales. Parte del enlace de bajada se utiliza para comunicar por parte de las estaciones base a los suscriptores cómo se reparte en la subtrama de subida para saber cuando podrán transmitir. La subcapa de subida contiene información de usuario y control de las PDUs y otras cosas como el ancho de banda necesitado.

La siguiente cabecera de control de trama (FCH) contiene el prefijo DL y ocupa un símbolo OFDM. Este prefijo (DFLP) especifica la localización tal como la modulación y la codificación sobre los 4 DLs siguientes al FCH.

La subtrama UL contiene campos de un rango inicial y de petición de ancho de banda de diferentes transmisiones que provienen de los diferentes suscriptores. El rango inicial permite a un terminal entrar al sistema reportando los CIDs básicos, ajustando el nivel de potencia y frecuencia y corrigiendo su offset. El campo ancho de banda se utiliza en los terminales para transmitir la petición de ancho de banda.

La MAC PDU está formada por una cabecera de 6 a 13 bytes, un payload variable y 4 bytes de redundancia (CRC) opcionales. La longitud de las PDUs MAC puede variar entre 6 y 2051 bytes. El control de los mensajes MAC se hace a partir del campo CRC. El tamaño de la cabecera contiene ciertos campos de control, donde no entraremos, así como si los paquetes están fragmentados (sí es posible) y si se utiliza ARQ.

Las terminales introducen sus datos de usuario en las PDU MAC localizadas en su espacio reservado de la subcapa de subida de la trama. Cada una de estas subtramas de usuario tiene un preámbulo opcional.

Como podemos ver solamente hay posibilidad de colisiones en el canal de subida en la parte que se asigna a las peticiones de las terminales para poder transmitir.

### 2.2.3 Subcapa de Seguridad

La subcapa de seguridad provee de privacidad a través de la red a través de una encriptación entre las terminales y la estación base. El payload de la PDU, es encriptado pero no se indica en la cabecera MAC: el tipo de encriptación se negocia durante el inicio de la conexión.

### 2.2.4 Tipo de conexión

Los flujos de datos de comunicaciones se asocian a un identificador de flujo identificado como Identificador de Conexión (CID). Un flujo de servicio es un flujo unidireccional de paquetes al que se le asigna un nivel de QoS particular.

En una topología PMP, el mecanismo de acceso al medio entre las terminales y las estaciones base se ocupa de otorgar flujos de tráfico de manera dinámica a estas conexiones. Cada terminal indica la capacidad que necesita para cada conexión. En la parte DL, se atiende las peticiones de todas las terminales en una misma trama.

### 2.2.5 Clases de servicio

Para dar calidad de servicio, además de otros valores como throughput, latencia, retardo, etc. En WiMax se ofrece la distinción de flujos a partir de lo que denominamos tipos de servicio de *scheduler*:

En el estándar se difrencian 5 tipos de QoS:

- *Unsolicited Grant Service (UGS)* – Servicio garantizado sin solicitud:

Es para servicios en tiempo real, que generan paquetes de tamaño fijo de forma periódica, La estación base coloca intervalos periódicos para cada flujo, sin la necesidad de negociar un ancho de banda. Es un servicio rápido.

- *Real-Time Polling Service (rtPS)* – Servicio en tiempo real por votación:

Para servicios de tiempo real que generan paquetes de tamaño variable de forma periódica. La estación base asigna tiempo en el canal de subida periódicamente para que los terminales con este tipo de tráfico puedan hacer solicitudes de ancho de banda. En dichas solicitudes, se indica el volumen de datos que se desea transmitir. Es un servicio algo menos eficiente pero adaptable.

- *Extended Real-Time Polling Service (ertPS)* – Servicio en tiempo real por votación extendido, válido en la versión del estándar IEEE 802.16e:

También para servicios de tiempo real que generan paquetes de tamaño variable de forma periódica. Es un sistema híbrido entre UGS y rtPS. La estación base coloca periódicamente parte del canal para que los terminales transmitan. Los terminales comunican cambios de tamaño a través del ancho de banda asignado.

- *Non-Real-Time Polling Service (nrtPS)* – Servicio de votación para aplicaciones en tiempo no real:

Para servicios que no sean en tiempo real, que generan tamaños de paquete variables con una cantidad mínima de datos para transmitir. La estación base pregunta a los terminales regularmente, aunque no periódicamente. Cada petición especifica el volumen de datos con un límite máximo del tiempo entre peticiones.

- *Best Effort Service (BE)*:

Los terminales envían peticiones y esperan a que la estación base les permita transmitir. Solo se dispone de recursos sobrantes.

## 2.3. Porqué WiMax

Las ventajas principales de una banda fija para comunicaciones inalámbricas sobre sistemas como DSL y cables son básicamente los altos costes de infraestructuras de cable. Además, el hecho de no tener que hacer enlaces con visión directa supone mayor ahorro a la hora de crear las infraestructuras. El largo radio de célula permite rápidamente crear las infraestructuras de red. Esto reduce el tiempo de comercializar nuevos servicios con nuevos anchos de banda, cosa crucial para atraer a nuevos proveedores. Las redes pueden ser escalables (se pueden ampliar fácilmente) y se pueden crear redes MESH (redes P2P sin un nodo centralizado). El sistema permite a los operadores ofrecer servicios que requieren altos anchos de banda. La calidad de servicio según el tipo de tráfico puede ser controlada por el sistema a nivel de flujo.

Por su parte WiMax, en comparación a otras tecnologías inalámbricas, ofrece velocidades más elevadas así como una mayor cobertura. Además al trabajar en frecuencias de hasta 11Ghz, parte de estas frecuencias son de libre uso sin licencia, no como WiFi que trabaja en bandas sin licencia (2,4 y 5 Ghz), aunque actualmente WiMax también utiliza las frecuencias de 2,5 y 3,5 Ghz las cuales sí tienen licencia. En las últimas versiones también es posible el movimiento de los terminales conectados a una Estación Base y el uso de frecuencias mayores a 5.7GHZ.

WiMax podría ser la solución para el acceso a Internet en zonas rurales, en las cuales las tecnologías con cable son de costes muy elevados. WiMax ofrece mayores ventajas que iremos viendo durante la memoria.

## 2.4. WiMax vs WiFi

**Tab. 2.2:** Comparativa WiMax-WiFi

|                      | <b>802.11 (WiFi)</b>                                     | <b>802.16 WiMax</b>   |
|----------------------|--|---|
| <b>Rango</b>         | Optimizado para usuarios situados hasta 100 metros       | Optimizado para células entre 7-10Km de radio, pudiendo llegar a los 20km               |
| <b>Cobertura</b>     | Optimizado para interiores                               | Optimizado para espacios exteriores   |
| <b>Escalabilidad</b> | El ancho de banda del canal es fijo de 20MHz             | El ancho de banda es flexible entre 1,5MHz y 20MHz<br>Las frecuencias son reutilizables |
| <b>Bit rate</b>      | Hasta 54Mbps en canales de 20MHz                         | En 20 MHz encontramos velocidades de hasta 75Mbps. Podemos llegar a 100Mbps             |
| <b>QoS</b>           | Se ofrece calidad de servicio en la versión IEEE 802.11e | Permite diferenciar el tipo de tráfico a nivel de flujo.                                |

En la siguiente tabla podemos ver una comparativa con las anteriores tecnologías celulares:

**Tab.2.3.:** Comparativa con otras tecnologías

| Medida                                  | Celular              |                             |                      | WiMAX  |   |
|---|----------------------|-----------------------------|----------------------|--|---|
|   | Edge                 | HSPDA                       | 1xEVDO               | 802.16-2004  | 802.16e†                                  |
| Familia tecnológica y modulación        | TDMA<br>GMSK y 8-PSK | WCDMA (5 MHz) QPSK y 16 QAM | CDMA2K QPSK y 16 QAM | OFDM/OFDMA QPSK, 16 QAM y 64 QAM                   | OFDMA QPSK escalable, 16 QAM y 64 QAM     |
| Velocidad pico de los datos             | 473 Kbps             | 10,8 Mbps                   | 2,4 Mbps             | 75 Mbps (canal de 20 MHz) 18 Mbps (canal de 5 MHz) | 75 Mbps (máx.)                            |
| Velocidad promedio para el usuario      | Velocidad < 130 Kbps | < 750 Kbps inicialmente     | < 140 Kbps           | 1-3 Mbps   | 80% de rendimiento del modelo de uso fijo |
| Alcance en exteriores (célula promedio) | 2-10 km              | 2-10 km                     | 2-10 km              | 2-10 km  | 2-7 km                                    |
| Ancho de banda del canal                | 200 KHz              | 5 MHz                       | 1,25 MHz             | 1,5-20 MHz, escalable                              | 1,5-20 MHz, escalable                     |

**Tabla 1.** Comparación entre las tecnologías celulares y WiMAX.

## 2.5. Evolución de la familia IEEE 802.16

El 802.16 especifica la interfaz aire para redes inalámbricas metropolitanas (Wireless MAN). En este estándar se recogen todas las características de WiMax. El estándar fue publicado el 8 de Abril de 2002, fue creado en 2 años, en un proceso abierto en el que participaron cientos de ingenieros tanto mundo de los operadores como de los suministradores. La evolución de esta familia es la siguiente:

- **802.16:** Utiliza espectro licenciado en el rango de 10 a 66 GHz, necesita línea de visión directa, modulación QAM. 2002
- **802.16a:** Ampliación del estándar 802.16 hacia bandas de 2 a 11 GHz, con sistemas NLOS y LOS, OFDM y OFDMA. Abril 2003
- **802.16b/c:** Ampliación del estándar 802.16 para definir las características y especificaciones en la banda d 10-66 GHz. Publicado en enero de 2003
- **802.16d:** Revisión del 802.16 y 802.16a para añadir los perfiles aprobados por el WiMAX Forum. Aprobado como 802.16-2004 en junio de 2004 (La última versión del estándar)
- **802.16e:** Incluye la conexión de banda ancha móvil para elementos portátiles del estilo a notebooks, OFDM escalable, antenas múltiples, ARQ híbrido. 2005

## CAPITULO 3. Entorno del Simulador de Sistemas de Comunicaciones: OPNET modeler 14.5

En este apartado se van a explicar las herramientas utilizadas para el desarrollo del proyecto. Se explica en qué consiste OPNET, nuestra herramienta de simulación, y en el siguiente apartado se muestra lo que hay implementado en OPNET del estándar IEEE 802.16 (WiMax).

### 3.1. Introducción

Las simulaciones de sistemas utilizando equipos informáticos son en la actualidad de gran aplicación en las ingenierías. En ellas podemos observar la evolución de un sistema en concreto con sus características, propiedad, cambios... El objetivo es recrear un modelo lo más fiable posible a la realidad, para poder estudiar los resultados obtenidos mediante la simulación.

Por ello para poder realizar nuestro proyecto hemos dispuesto de un simulador de red que ofrece herramientas potentes con el objetivo de diseñar modelos, simular datos y analizar redes.

En la parte de conexiones que no sean inalámbricas o satélites, OPNET proporciona una gran variedad de librerías para poder simular una gran variedad de redes. Pero como veremos durante la memoria, OPNET ha diseñado parte del estándar IEEE 802.16 pero falta aun mucho por retocar, por ejemplo el hecho de que hayan implementadas únicamente tres de los cinco tipos de *scheduler*, la poca variedad de suscriptores y estaciones base, etc.

### 3.2. Qué es OPNET

Es una plataforma de simulación orientada a las comunicaciones. Proporciona acceso directo al código fuente siendo esto una gran ventaja para los nuevos programadores.



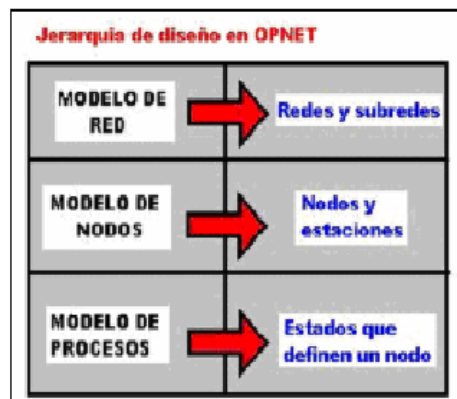
OPNET modeler es una poderosa herramienta que permite simular sistemas de comunicaciones y así evaluar las prestaciones de una red bajo diversas condiciones de simulación como: flujos variables de tráfico, pérdida de paquetes o de conexiones entre terminales y la estación base, caídas de enlaces, etc.

Este software fue desarrollado en el año 1984 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) por investigadores y científicos del Laboratorio de Información y Decisión de Sistemas (LIDS). Es un software comercial, el cual es la segunda plataforma de simulación más usada en telecomunicaciones después de NS-2.

### 3.3. Cómo funciona OPNET

Para comprender el funcionamiento de OPNET, antes se ha de conocer la jerarquía de diseño que rige los modelos implementados en este software. Una de las mayores ventajas de OPNET Modeler es la interfaz con el usuario, es decir, es un simulador gráfico y la distinción en niveles de jerarquía facilitan el uso de esta herramienta.

Los niveles de jerarquía se muestran a continuación:



**Fig.3.1.:** Jerarquía de diseño en OPNET

El primer nivel está formado por el modelo de red, donde definiremos nuestra red y podríamos definir subredes si se diese el caso. El segundo nivel es el modelo de nodos donde se permite definir la estructura interna de cada uno de los componentes (nodos) de las redes. Finalmente el nivel de procesos constituido por los estados que definen la función de cada nodo. Este último es la base del sistema y permite al usuario programar en lenguaje c++ las funciones de cada módulo, como podemos ver a continuación, haciendo clic en un estado del modelo de procesos podemos entrar en las funciones que definen el comportamiento de la red, programadas en c++.




**Fig.3.2.:** Visión global de OPNET

Además de estas aplicaciones, existen otros editores que permiten configurar componentes de la red o de la simulación propia, como el editor de paquetes, antenas, enlaces... que veremos en el punto 5 de este apartado.

### 3.3.1 Network Modeler (modelo de red)

Es la interfaz que abarca la red entera y sus componentes. Aquí se definen las redes con todos sus componentes (links, estaciones, terminales...) de forma gráfica. Aquí únicamente se conectan los nodos mediante links, si existen.

### 3.3.2 Node Modeler (modelo de nodos)

Aquí se definen todos los nodos de nuestra red a simular. En su interior, cada nodo puede tener varios módulos. Los módulos tienen definidas funciones internamente, por ejemplo un modulo de este tipo: , sería utilizado como receptor. En la siguiente figura podemos ver como se relacionan los módulos:

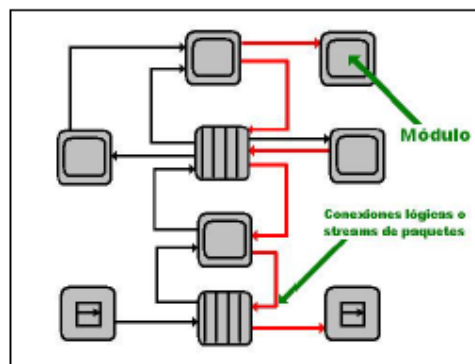


Figura 2.2. Funcionamiento del modelo de Nodos.

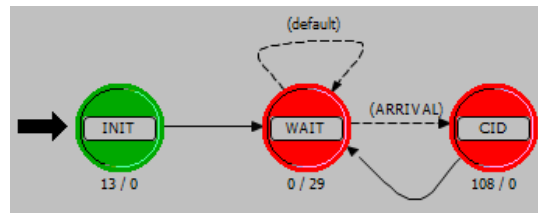
**Fig.3.3.:** Funcionamiento del modelo de nodos

### 3.3.3 Process Modeler (modelo de procesos)

Como hemos dicho anteriormente, en este último nivel definimos lo que ha de realizar cada módulo, algunos como el que hemos expuesto anteriormente ya están programados, pero hay de otros que aparecen vacíos y debemos programar su funcionamiento.

La funcionalidad de cada módulo se define a través de modelos de procesos que se representan mediante máquinas de estados finitos (FSM). Las transiciones entre estados pueden ser condicionales o incondicionales. Todas las funcionalidades son programadas en c/c++. A continuación tenemos un ejemplo:





**Fig.3.4.:** diagrama de estados

El código del programa se asocia en cada estado, en el caso del INIT, podemos ver que tiene trece entradas y cero salidas, para acceder al código hemos de hacer doble clic en la parte superior de INIT o en la inferior, según queramos ver las entradas o las salidas de este estado.

### 3.4. Fases para una simulación

Para realizar una simulación con OPNET se han de realizar 4 fases:

- ✓ Una primera fase seria la especificación del modelo a estudiar. Crearemos nuestra red
- ✓ Una vez especificado el modelo a simular, debemos elegir los datos a recolectar. Elegiremos las estadísticas y empezaremos la simulación.
- ✓ Como último paso tendríamos el análisis, donde validaremos las especificaciones expuestas en el modelo. Obtendremos y analizaremos los resultados de la simulación.

Una simulación está compuesta por varios eventos que describen los sucesos en momentos determinados. Para conseguir el análisis, hemos de colocar variables estadísticas en los puntos que se desean observar. Es decir si queremos mirar los paquetes perdidos en un receptor, hemos de seleccionar dicha variable, dentro de la lista de variables que tiene dicho receptor.

### 3.5. Partes de OPNET

A continuación explicaremos las diferentes partes de que consta OPNET Modeler. Los editores proporcionan las herramientas necesarias para la creación de topologías de red. Cada de editor de estos, se encarga de una tarea distinta:

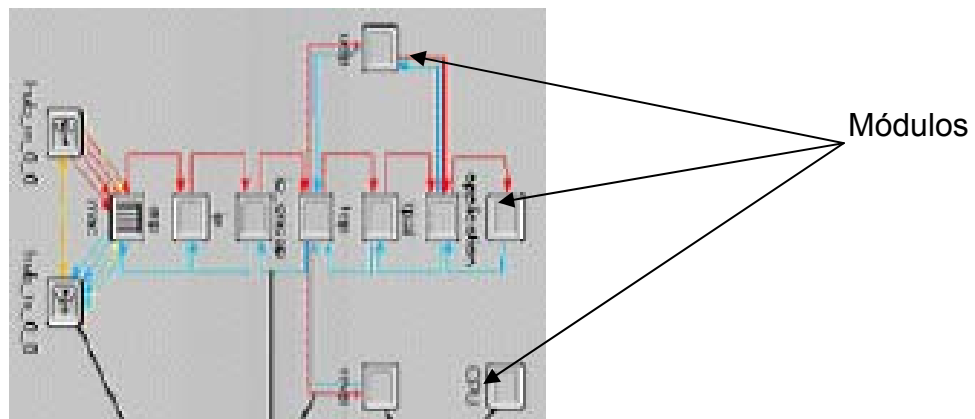
#### 3.5.1 Project Editor

Es usado para crear un modelo de red utilizando unos ya existentes que encontramos en las librerías. También podemos recolectar estadísticas sobre la red, empezar simulaciones y ver resultados.

Así mismo podremos crear nodos, paquetes, filtros... que hayamos definido anteriormente en cada editor. Para ello se dispone de una paleta con todos los objetos disponibles, tanto de librerías como las que uno mismo edita.

### 3.5.2 Node Editor

Es un editor que es usado para crear modelos de nodos, definiendo sus comportamientos a partir de diferentes módulos.



**Fig.3.5.:** editor de nodos

### 3.5.3 Process Model Editor

Los Process Model son representados por estados y son creados por iconos que representan estos estados y líneas que representan las transiciones entre ellos. Como hemos dicho anteriormente las operaciones que realizan cada estado o transición se escriben en el lenguaje c++.

Podemos decir que los objetos más importantes en este editor son:

- Los estados: existen dos tipos, los forzados y los no forzados
- Transiciones: Marcan la condición que necesita para pasar de un estado a otro.
- Bloques: Sirven para la programación, declarar variables, funciones...

### 3.5.4 Link Model Editor

En este se nos permite crear objetos de enlace. Cada nuevo tipo de link puede tener diferentes atributos y representaciones.

### 3.5.5 Path Editor

Este editor es utilizado para crear nuevos objetos de rutas que sirven para definir el tráfico.

### 3.5.6 Probe Editor

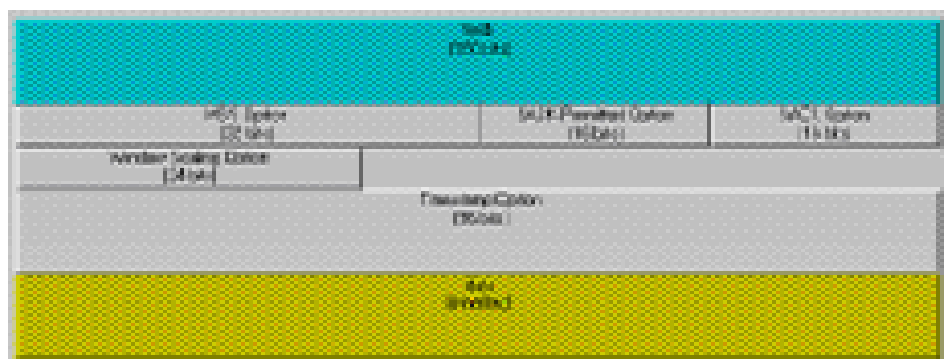
Probe Editor es usado para especificar las estadísticas que van a ser recopiladas. Pueden ser de diferentes tipos: estadísticas de enlaces, de nodos, de atributos, etc.

### 3.5.7 Simulation Sequence Editor

Este editor nos permitirá añadir una simulación adicional en tiempo real, donde podremos añadir valores adicionales como el control del tiempo de simulación o la velocidad de dicha simulación

### 3.5.8 Packet Format Editor

Aquí se nos permite la definición de la estructura interna de un paquete como un conjunto de campos. El formato de un paquete contiene uno o más campos representados como se muestra a continuación:



**Fig.3.6.** editor de paquetes

## CAPITULO 4. WiMax en OPNET

Una vez explicado en qué consiste OPNET y sus partes más destacables, ahora nos falta saber qué tiene implementado con respecto a la tecnología IEEE 802.16. En este apartado veremos que se incluye del modelo WiMax.

El modelo incluye un módulo de simulación de evento discreto que permite analizar el rendimiento de la red inalámbrica en una red de área metropolitana.

El modelo implementado de WiMax incluye gran parte de las características del estándar IEEE 802.16e.

Para poder ejecutar las simulaciones, visualizar o modificar los modelos de procesos, es necesario obtener la licencia específica de dicho módulo, así como el módulo Wireless.

### 4.1 Características y limitaciones

En la siguiente tabla observamos las características soportadas y una pequeña descripción de ellas:

**Tab.4.1.:** características implementadas de WiMax.

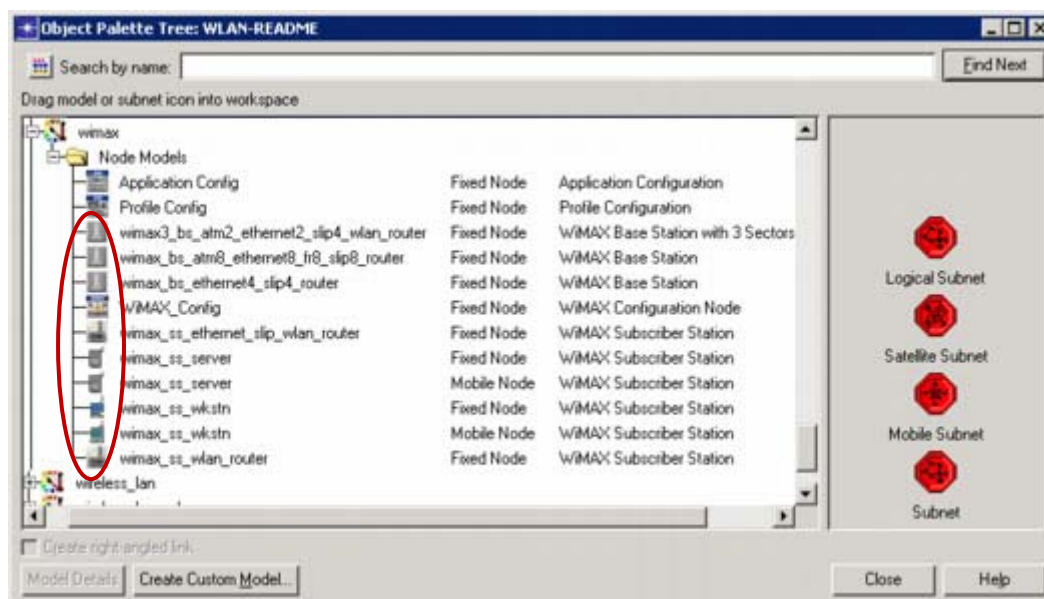
| Características del modelo           | Descripción  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Mensajes MAC</b>                  | Se incluyen las siguientes cabeceras de la capa MAC: <ul style="list-style-type: none"> <li>· IEEE 802.16e MAC PDU</li> <li>· Mensajes de control (Peticiones de BW)</li> <li>· Mensajes ARQ (respuesta, descartes y reset)</li> <li>· Mensajes de movilidad y ranging</li> </ul>  |
| <b>Control del enlace radio</b>      | El modelo nos permite crear una configuración inicial para cada conexión   |
| <b>Scheduling Service</b>            | Soporta los 5 servicios del planificador: (UGS, ertPS, nrtPS, rtPS y BE). Únicamente se disponen de tres de ellas implementadas: UGS, nrtPS y BE   |
| <b>ARQ</b>                           | El mecanismo de retransmisión automático se incluye en la capa WiMax MAC y permite: <ul style="list-style-type: none"> <li>· Soporte para conexiones UGS, nrtPS y BE</li> <li>· Se permiten para flujos individuales de servicio en los clientes</li> <li>· Habilidad para permitir SDUs en orden</li> <li>· Permite overread CRC-32 para flujos individuales</li> </ul> |
| <b>Ranging</b>                       | Soporta el modelo de ranging.  |
| <b>Modelado de paquetes perdidos</b> | Existen dos métodos para emular pérdidas de paquetes: <ul style="list-style-type: none"> <li>· Cuando se incluye la capa física, el modelo puede contar las pérdidas que se han causado por culpa de dicha capa.</li> </ul>  |

|   |   |
|---|---|
| <b>Modelado de paquetes perdidos</b>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>· Cuando se permite la desfragmentación, en cada terminal podemos crear pérdidas de paquetes.</li> </ul> <p>Solo se puede utilizar uno en cada simulación y se determina en el modo de eficiencia de los atributos WiMax, como veremos más adelante</p>  |
| Características del modelo  | Descripción   |
| <b>Mecanismos para la petición de Ancho de Banda</b>                  | Se soportan dos tipos de peticiones de BW: en el campo <i>BW request</i> o en peticiones Piggybacked.   |
| <b>Asociación inicial entre SS(suscriptores) y EB (Estación Base)</b> | Podemos elegir a que estación base conectarnos, por defecto, nos conectaremos a la más cercana.   |
| <b>Movilidad</b>  | Se definen las siguientes características:<br>Aviso a/de los vecinos, medida de niveles, escaneo, hard handover...  |
| <b>Calidad de servicio (QoS)</b>                                      | <p>Se implementan las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Flujos de servicio (admitidos y activos)</li> <li>· Parámetros de nombre de tipo de servicio de planificación (<i>scheduler service</i>)</li> <li>· Según estados de colas</li> <li>· Creación de flujos de características dinámicas</li> </ul> |
| <b>Capa Física (PHY)</b>  | Se incluyen efectos de capa PHY como overheads, así como perfiles físicos OFDM/OFDMA o SC.<br>También se modelan las interferencias co-canal, fading...   |
| <b>Tráfico broadcast y multicast</b>                                  | El modelo soporta tráfico broadcast o multicast cuando la se incluye la capa física.  |

Por otra parte, tenemos que WiMax en OPNET sufre una serie de limitaciones que no han sido implementadas como por ejemplo el control de la energía o potencia, la entrega asistida por la red, así como el período inicial de ranging en la estación base, dos modelos del tipo de *scheduler* (rtPS y ertPS). También sabemos que el programa es rígido y no permite la modificación de sus estaciones base ni sus suscriptores, y únicamente, como veremos a continuación, disponemos de tres tipos de suscriptores y otros tres de estaciones base.

## 4.2. Node Models

Dentro del modelo de nodos, vemos que WiMax tiene implementados los siguientes objetos dentro de la paleta de diseño del programa:



**Fig.4.1.:** Paleta de objetos

➤ **Application Config:**

Aquí hay definidas una serie de aplicaciones, al incluir dicho nodo, podemos utilizar las aplicaciones que están definidas, como: FTP, VoIP, Streaming, descarga HTTP pesada...

➤ **Profile Config:**

WiMax tiene definidos cinco tipos de perfiles de tráfico, en los cuales no entraremos porque no utilizaremos ninguno. Estos perfiles tienen características diferentes y se utilizan en el flujo de datos que envía el emisor.

Existen tres tipos de estaciones bases (BS) creadas, ahora veremos las diferencias entre ellas:

- Wimax3\_bs\_atm2\_ethernet2\_slip4\_wlan\_router:

Esta estación base contiene una antena tri-sectorial. La estación tiene funcionalidad de router. Contiene dos interfaces ATM, dos interfaces ETHERNET, cuatro interfaces SLIP, una WLAN y tres de WiMax, una para cada sector.

- Wimax\_bs\_atm8\_ethernet8\_fr8\_slip8\_router:

Esta estación tiene una antena con un único sector, es por eso que solo tiene una interfaz WiMax, también tiene funcionalidad de router. Contiene ocho interfaces ATM, ocho interfaces ETHERNET, ocho interfaces SLIP y otras ocho para Frame Relay.

- Wimax\_bs\_ethernet4\_slip4\_router:

La última que tenemos también es de un único sector, y contiene cuatro interfaces ETHERNET y cuatro SLIP. También tiene funcionalidad de router.

Además de estos tres tipos de estaciones base disponemos a su vez de tres tipos de suscriptores (SS):

- Wimax\_ss\_server:

Una estación suscriptora con funcionalidades de servidor.

- Wimax\_ss\_workstation:

Otra opción es coger un suscriptor con funcionalidades de “Workstation”

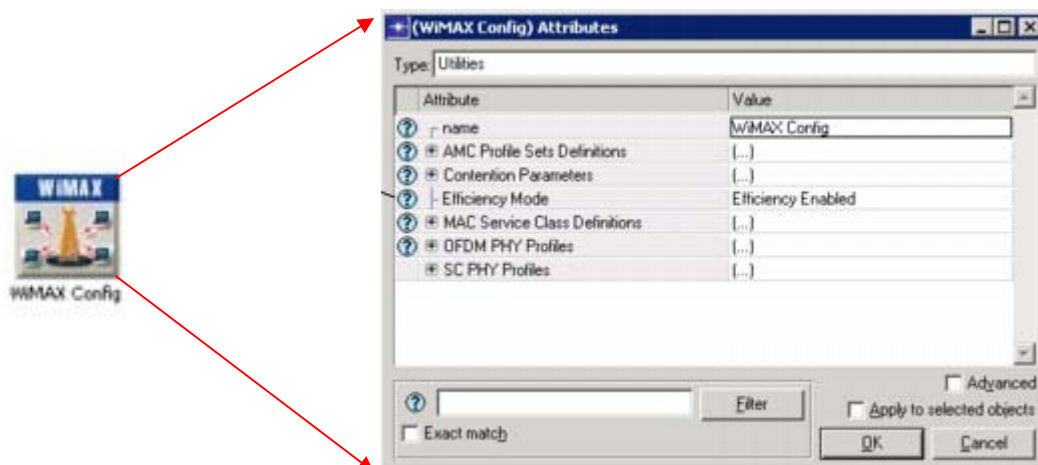
- Wimax\_ss\_wlan\_router:

Un móvil suscriptor con funcionalidades de router. Este además tiene una interfaz Wireless LAN.

A parte de todo lo descrito tenemos un objeto más, que se encarga de la configuración global:

- WiMAX\_Config: Este nodo u objeto se usa para configurar parámetros como clases de servicio o perfiles de capa física. En la siguiente figura, podemos ver los atributos y valores de este objeto. Clicando encima de él se nos despliega el siguiente cuadro donde podremos modificar las características WiMax tales como: Perfiles AMC “Adaptive Modulation and Coding” (donde no entraremos), parámetros de contención o el modo de eficiencia (que se explicará mas adelante).

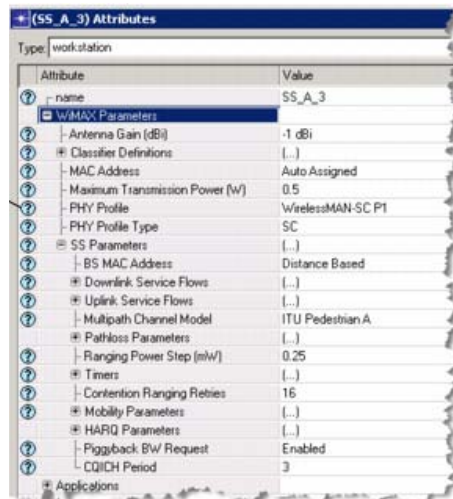
Además podemos modificar parámetros a niveles MAC, como serían las clases de servicio, y parámetros a nivel físico para OFDM o SC.



**Fig.4.2.** atributos WiMax.

### 4.3. Atributos de las estaciones base (BS) y los suscriptores (SS)

En los atributos tanto de las BS como de los SS, tenemos un apartado con todos los parámetros WiMax a especificar/configurar. A continuación mostraremos los atributos de un SS. Las estaciones base tienen los mismos parámetros a modificar, aunque en el caso de que la estación base elegida fuese de tres sectores, tendríamos tres atributos WiMax, uno para cada sector de la antena. Clicando en el suscriptor SS\_A\_3 se nos aparece el siguiente cuadro:



**Fig.4.3.:** atributos de un suscriptor



## CAPITULO 5. Creación de una red WiMax en OPNET

Para crear una red WiMax en nuestro modelo de red, se siguen cuatro pasos, de los cuales nosotros obviaremos el segundo porque no queremos utilizar la movilidad de los suscriptores por el momento:

### 5.1. Crear la topología de red

Cuando creamos el modelo de red, hemos de especificar primeramente una serie de características como el abaste geográfico. OPNET nos permite utilizar una serie de mapas que se disponen en sus librerías, estos mapas incluyen desde el contexto mundial hasta pequeñas ciudades o pueblos como Badalona por ejemplo. Además si no queremos ningún mapa en concreto como es nuestro caso, podemos elegir las dimensiones del área de red.

Una vez hayamos dado dichas dimensiones hemos de añadir los nodos que queremos utilizar a partir de la paleta de objetos. Podemos utilizar los nodos predefinidos con sus comportamientos, o utilizar los nodos que hayamos modificado o creado nuevo. En nuestro caso utilizaremos los que hemos creado a partir de otros nodos ya existentes.

### 5.2. Configurar la movilidad de los nodos

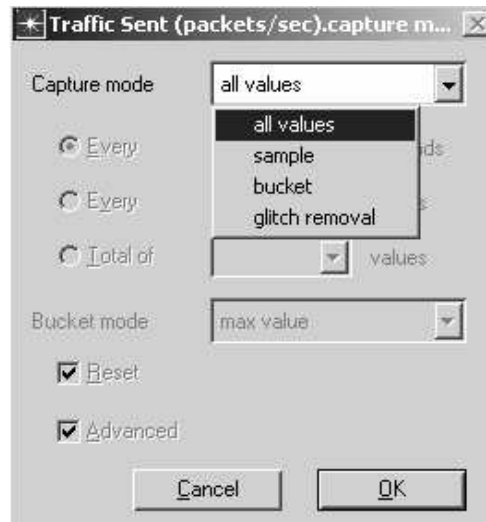
Como se ha dicho, no entraremos en esta fase, pero es bueno saber que OPNET nos permite configurar las trayectorias de los suscriptores, así como configurar un movimiento aleatorio de los terminales.

### 5.3 Añadir tráfico al modelo de red WiMax

Después de crear la topología, hemos de introducir el tráfico.

En todos los tutoriales OPNET, se utiliza como herramienta de creación de tráfico, el *Raw Packet Generation*:

- *Raw Packet Generation (RPG)*. Con esta herramienta se pueden crear flujos de tráfico en diferentes fuentes, dando propiedades distintas a cada flujo. Gracias a esta opción, crear tráfico en OPNET es relativamente sencillo. A continuación se muestra una imagen de cómo crear tráfico con esta herramienta:



**Fig.5.1:** herramienta Row Packet Generator

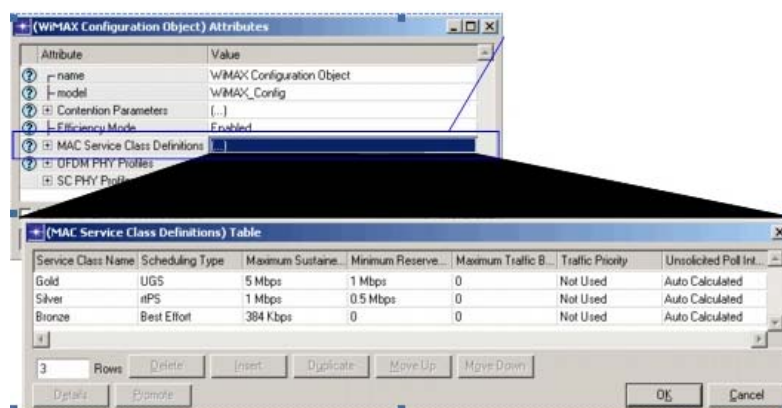
En la memoria, no queremos extendernos más con esta herramienta porque según las especificaciones de WiMax en OPNET, podemos crear tráfico utilizando aplicaciones discretas de tráfico como FTP, e-mail... El modelo no soporta otras formas de crear tráfico para WiMax, por lo tanto no hemos podido utilizar el RPG ni la opción “traffic flows” para crear nuestro tráfico. Hemos tenido que ir creando tráfico dentro de cada suscriptor indicando siempre a quien enviaremos y a que estación base nos conectaremos.

## 5.4. Configurar los parámetros WiMax

A continuación veremos qué pasos hemos de seguir para configurar la funcionalidad de nuestra red:

### 1. Definir las clases de servicio

Las clases de servicio son definidas en los atributos del nodo “WiMax Config”. Las clases de servicio se asocian con los flujos de tráfico de los nodos suscriptores. En la siguiente imagen veremos los atributos:



**Fig.5.2.:** clases de servicio OPNET

En OPNET, como podemos observar, hay implementadas tres clases de servicio: GOLD, SILVER y BRONZE. Podemos cambiar las características de cada una de ellas tal y como indica la tabla del dibujo anterior, donde podemos observar que hemos asociado GOLD a UGS con sus parámetros, SILVER con nrtPS y BRONZE con Best Effort

Se pueden añadir otras clases definidas por el diseñador.

## 2. Configurar el modo de eficiencia

Dependiendo del resultado que queramos obtener, podemos operar en cuatro modos de eficiencia, la única diferencia entre ellos son las características WiMax que incluyen. Según el modo de eficiencia elegido, tardaremos más o menos en la realización de la simulación. Por eso en nuestro caso como no queremos movilidad, hemos utilizado “Physical layer enable”.

Modos de eficiencia:

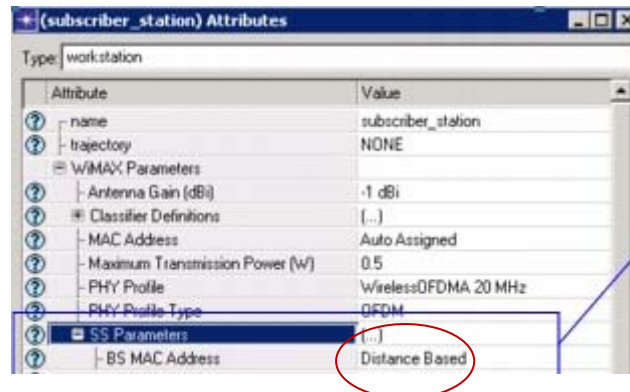
- ✓ Mobility and Ranging: Incluye todas las características del estándar IEEE 802.16e, así como la movilidad, que solo se especifica en esta revisión. Es la que tiene mayor carga computacional al realizar la simulación
- ✓ Physycal Layer Enable: Contiene todos los parámetros excepto los dos anteriores. Por ello hemos elegido este. En éste se pueden simular todos los efectos de capa física, así como la pérdida de paquetes por culpa de dicha capa.
- ✓ Framing Module Enable: Esta contiene todas las características excepto movilidad, ranging y efectos de capa física. Pero si que se permite el fragmentado. Tanto esta como la anterior aportan menos tiempo de simulación que la primera de todas.
- ✓ Efficiency Enable: En este último se incluyen las características de la primera revisión del estándar IEEE 802.16a, por lo tanto, no tiene en cuenta nada de lo explicado anteriormente. Tampoco dispone de retransmisiones ARQ.

## 3. Configurar la capa física

En nuestro caso, no queremos modificar ningún parámetro a nivel de capa física, ya que hemos observado que las características de esta capa por defecto se adecuan al estándar. Esta capa se utiliza para estimar las capacidades de los links, overheads...

## 4. Asociar suscriptores con estaciones base

Por defecto, las estaciones suscriptoras se conectarán a la estación base que tengan más cercana. No obstante podemos cambiar este valor en el campo como indica la siguiente figura:



**Fig.5.3.:** atributo selección de suscriptores

En los parámetros de WiMax de un suscriptor, dentro del campo “SS parameters” encontramos el campo “BS MAC Address”, éste por defecto sale como *Distance Based* con lo cual la estación se conectará a la EB más cercana, o la que tenga el mejor canal para transmitir.

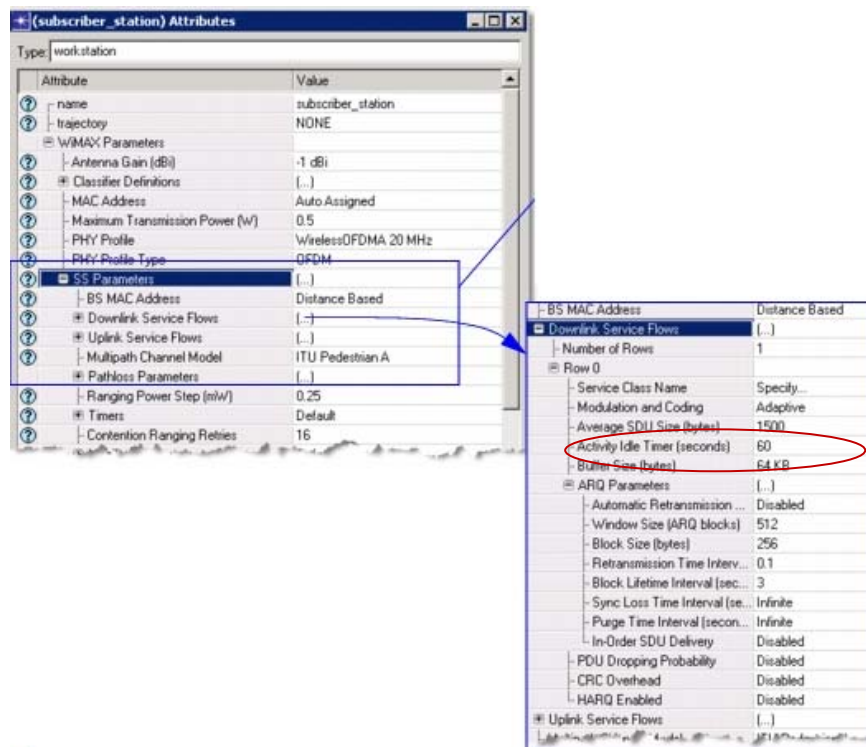
Este campo es muy útil para cuando se utiliza movilidad, para definir la primera asociación con una estación base. En nuestro esquema, no nos hace falta disponer de más estaciones base, es por ello que dejamos el atributo con el valor por defecto.

## 5. Definir los flujos de servicio

Una vez creadas las clases de servicio, que por defecto son tres, GOLD/SILVER/BRONZE, podemos asignar estas clases a los flujos que creamos entre un terminal y la estación base a la que está asociado. Existen dos tipos de flujo de servicio, los de subida (UpLinks), que van desde el suscriptor a la estación base, y los de bajada (DownLinks), que van en sentido contrario.

Para asignar dichas clases a los flujos, hemos de hacerlo en el nodo suscriptor como veremos en la siguiente captura. Por defecto los flujos que no sean asociados a ninguna clase de servicio serán tratados como flujos *Best Effort*, tanto en los canales de subida como en los de bajada.

A continuación se muestran los atributos de un nodo suscriptor, para realizar los cambios nombrados, hemos de acceder a *WiMax Parameters > SS parameters*. Dentro de éste, encontramos los flujos de subida y los de bajada:

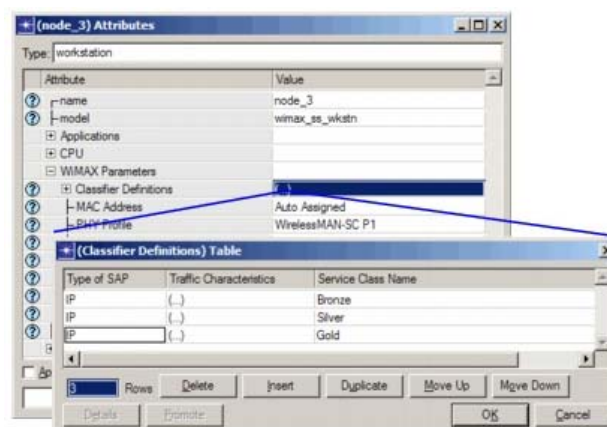


**Fig.5.4.:** atributo de clase de servicio

Tanto dentro de un flujo UpLink, como DownLink, podemos definir múltiples flujos y cada uno de ellos será insertado en una nueva columna. La única pega es que a cada flujo se le ha de asignar una clase de servicio única. Es decir no podemos crear dos flujos desde el mismo emisor a la estación base y que ambos sean tratados como GOLD o SILVER o BRONZE, cada uno de ellos tendrá una clase de servicio única para ese terminal.

Tenemos la posibilidad de duplicar dichas clases dándoles otros nombres o creando clases nuevas y asociarlas a los flujos.

## 6. Asignar tráfico a las clases de servicio



**Fig.5.5** asignación de tráfico

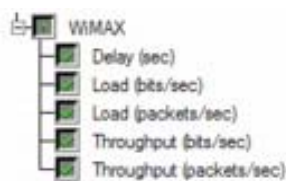
Podemos asignar tráfico a las clases de servicio a partir de los parámetros de WiMax tanto en el suscriptor como en la estación base. Si es en el suscriptor tendremos en cuenta los flujos de subida y si por el contrario es en la EB, tendremos en cuenta los de bajada.

Esto nos será muy útil a la hora de crear tráfico y darle una prioridad u otra dentro de los flujos que se habrán creado.

Además de estos seis pasos, también es posible configurar la capa física de WiMax, como el control de potencia, o podemos configurar los parámetros de movilidad como el handover o el rastreo de nuevas estaciones base.

## 5.5. Analizar nuestra red WiMax

Después de crear nuestra red, haber añadido tráfico y haber asignado éste a clases de servicio, OPNET nos ofrece una serie de estadísticas a recolectar en la simulación como las siguientes:



**Fig.5.6.:** estadísticas WiMax

Además de estas estadísticas a nivel WiMax, OPNET nos ofrece estadísticas a todos los niveles, como IP, TCP...

Según nuestros objetivos utilizaremos las estadísticas WiMax a nivel MAC, o las estadísticas a nivel IP, como haremos en el tercer escenario.

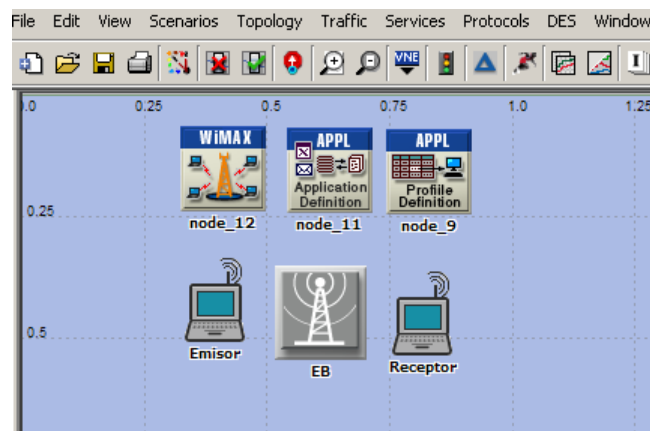
## CAPITULO 6. IMPLEMENTACION DE LOS ESCENARIOS

### 6.1.- Primer escenario

El primer escenario tiene como objetivo comprobar las diferentes funcionalidades de la implementación de Wimax en el entorno de desarrollo de OPNET.

Para crear un escenario Wimax hemos de introducir los siguientes elementos:

- Una estación base escogida entre las desarrolladas por OPNET. La elección de ésta no tiene importancia en este escenario, ya que no influye para nada el número de puertos que contenga.
- Estaciones de trabajo desarrolladas por OPNET. De los diferentes tipos, escogemos las que no tienen implementadas características de movilidad.
- *Wimax profile*, para configurar las diferentes clases de servicio y el modo de eficiencia.
- *Application definition*, para configurar las diferentes aplicaciones que se utilizarán.
- *Profile definition*, para configurar los diferentes perfiles de tráfico.



**Fig.6.1.** Topología primer escenario

En este escenario colocamos dos estaciones cliente y una estación base. En esta simulación introduciremos tráfico de un emisor a un receptor para comprobar que el tráfico se recibe. Se pueden implementar las configuraciones indicadas en la documentación y se pueden extraer diferentes tipos de estadísticas.

Queremos introducir tres flujos de tráfico de diferentes tipos para que estos flujos se asocien a un servicio de scheduler diferente. Creamos un flujo para UGS, otro para nrtPS y otro para BE.

### 6.1.1. Configuración Wimax Profile

En primer lugar, se ha de configurar el perfil de Wimax para definir el comportamiento de Wimax y sus diferentes perfiles:

- Por defecto, Wimax tiene implementado tres perfiles llamados Gold, Silver y Bronze. UGS se asocia al perfil Gold, nrtPS a Silver y BE a bronze. Para realizar este cambio se ha de modificar el “MAC Service Class Definitions” en modo por defecto, que introduce tres nuevas columnas indicando el nombre de la definición y el tipo de scheduler asociado.

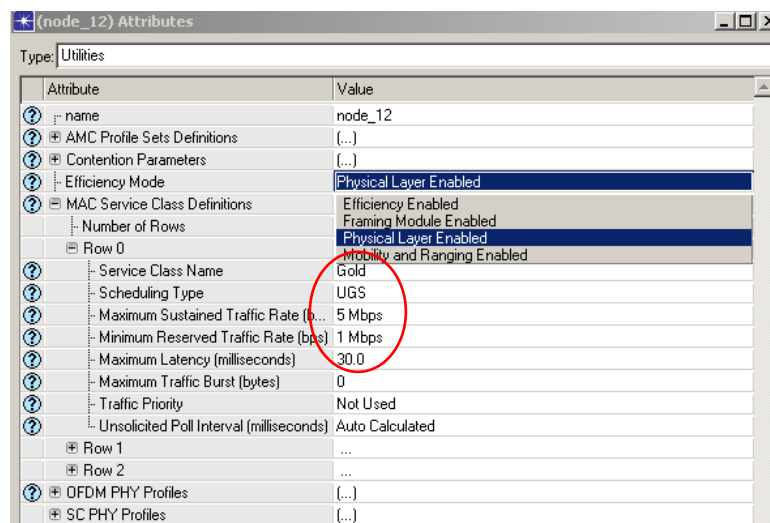


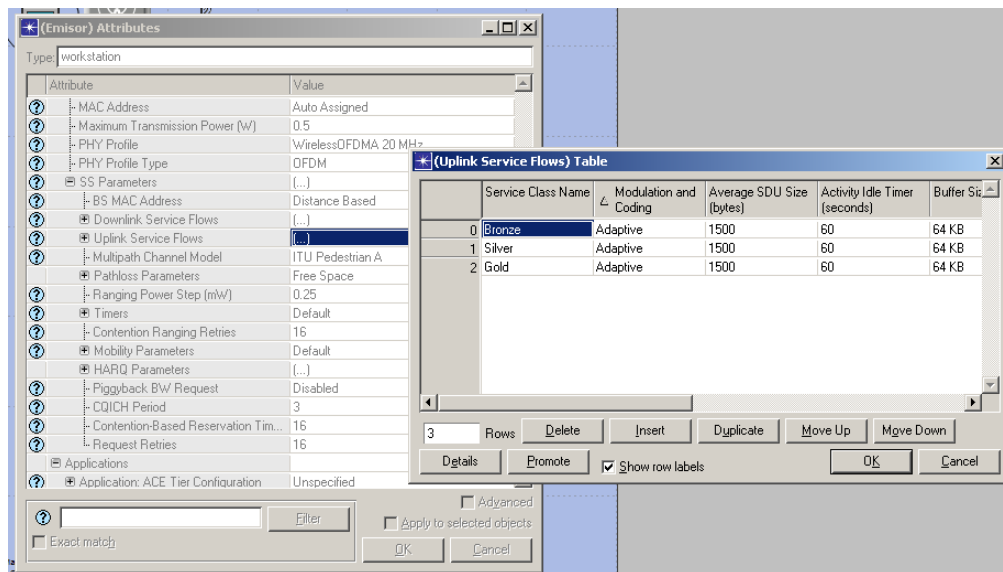
Fig.6.2 atributos WiMax Profile

- También seleccionamos el tipo de eficiencia de “Physical Layer Enabled”, que tiene implementadas todas las características de Wimax excepto movilidad y “ranging”, que no utilizaremos en nuestra simulación.

### 6.1.2. Configuración del emisor.

En el emisor tenemos que incluir los diferentes perfiles de aplicación en el canal de subida como vemos a continuación.



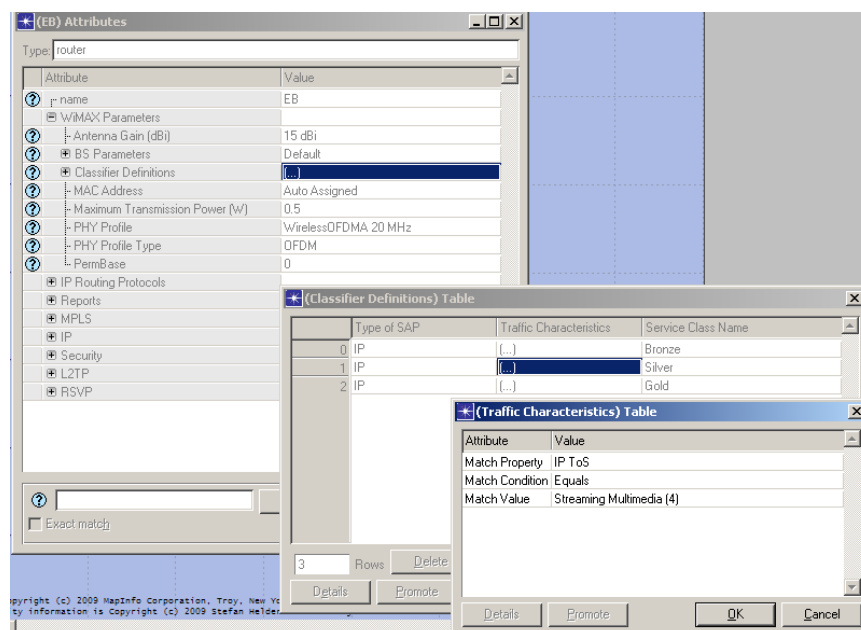


**Fig.6.3.** atributos nodo suscriptor

En el receptor hemos de hacer lo mismo, pero en el canal de bajada.

### 6.1.3. Configuración de la estación base.

En la estación base asociaremos cada flujo a un tipo de scheduler.



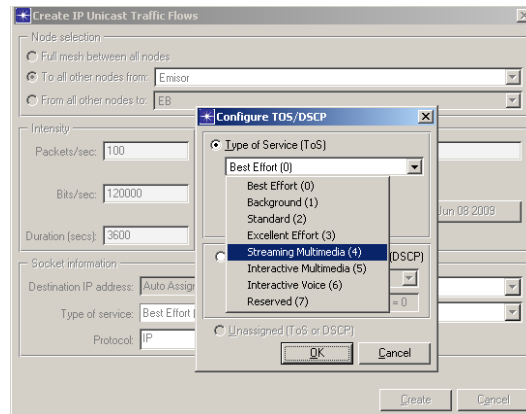
**Fig.6.4** atributos estación base

Hemos definido que el flujo BE sea tratado como bronze (BE), que el tráfico streaming multimedia sea Silver(nrtPS) y el tráfico de Voz sea Gold (UGS).

Aunque sabemos que streaming multimedia tiene las características de una aplicación en tiempo real, como solo disponemos de BE, UGS y nrtPS, hemos considerado, que era más eficiente tratar este flujo como un flujo nrtPS.

#### 6.1.4. Asignar tráfico del emisor al receptor.

Una vez configurados todos los parámetros, se han de crear tres flujos de tráfico del emisor al receptor. Para crear tráfico utilizaremos el “Traffic Center”.



**Fig.6.5** asignación de tráfico

Hemos inyectado 3 flujos:

- Uno de 100 paquetes por segundo que será tratado como un flujo *streaming multimedia* (asociado a Silver), el cual está definido en la imagen anterior.
- Otro de 200paq/s, interactive voice (Gold)
- Un último de 300paq/s., Best Effort (Bronze)

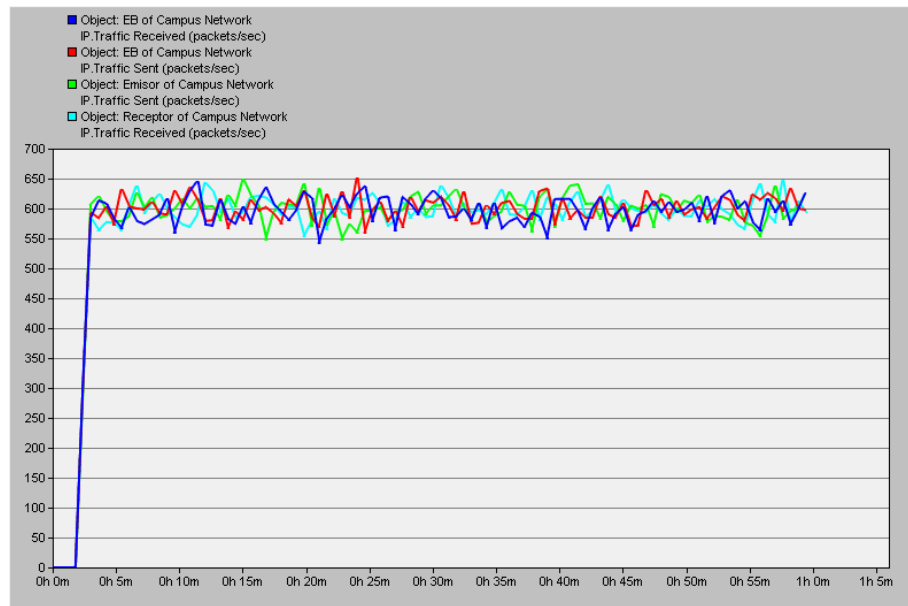
Se enviarán flujos de 120000 bits por segundo en 100 paquetes por segundo, por lo tanto enviaremos 1200 bits en cada paquete, que equivalen a 150 bytes por segundo.

#### 6.1.5. Recolección de estadísticas

Las estadísticas que queremos obtener son a nivel Wimax y a nivel IP. Queremos ver los valores del retardo y del tráfico recibido durante una hora.

Después de realizar la simulación, en la parte Wimax vemos que se hacen las peticiones por parte del emisor y que la estación base responde a estas indicando que puede transmitir.

Los resultados obtenidos son los siguientes:



**Fig.6.6:** gráfica de resultados

En la gráfica podemos ver:

- en azul, el tráfico recibido por la EB.
- En rojo, el tráfico enviado por la EB.
- En celeste el tráfico recibido por el receptor.
- En verde, el tráfico enviado por el emisor.

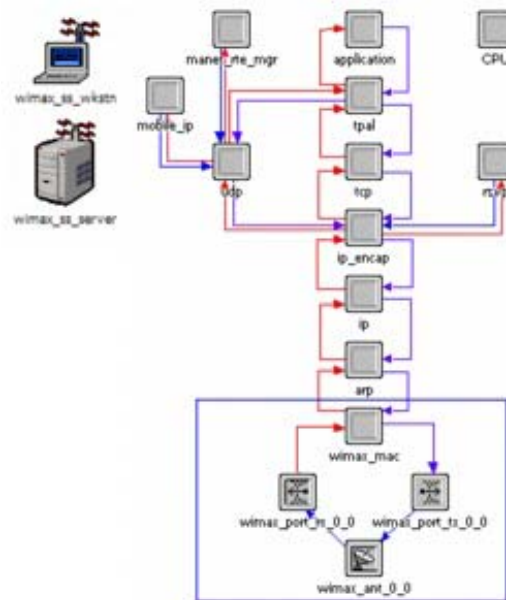
Al recolectar las estadísticas, no podemos separar los 3 flujos porque provienen de un mismo emisor. Esto se tendrá en cuenta para las próximas simulaciones. OPNET no tiene implementada ningún tipo de estadística que separe diferentes flujos.

Observamos que todo el tráfico enviado por el emisor es recibido por la estación base y reenviado al receptor. En la simulación podemos ver oscilaciones del tráfico debido al retardo provocado por el medio inalámbrico y los tiempos de proceso.

## 6.2.- Segundo escenario

### 6.2.1.- Arquitectura de un suscriptor (SS)

Dentro del nodo suscriptor, encontramos el siguiente diseño:



**Fig.6.7.** modelo de procesos de un suscriptor

La parte remarcada en azul, es la parte WiMax MAC del suscriptor, por donde se envían y se reciben las tramas a partir de la antena. Después de ello vemos como los paquetes viajan a capas superiores, IP, TCP/UDP, etc.

### 6.2.2. Modificación de la capa MAC de la estación base (BS)

El objetivo de este escenario es capturar los paquetes que recibe la estación base Wimax para separar el tráfico según su destino y el scheduler que tenga. Esto se hace para, al conectar la estación base a la red troncal, el tráfico esté dividido por diferentes tipos de prioridad.

Para ello, primero hemos de entender como están diseñadas las estaciones base implementadas por OPNET con tecnología Wimax.

### 6.2.3. Diseño del nodo estación base.

Explicaremos el diseño y funcionamiento de una estación base Wimax implementada por OPNET. Para ello, cogeremos el nodo más sencillo: wimax\_bs\_ethernet4\_slip4\_router. Este tiene 4 puertos Ethernet, 4 PPP y la interfaz Wimax.

El nodo es un conjunto de procesos y colas, conectados entre si según el orden de las capas. Cada proceso implementa diferentes funciones, según la



La antena representa el flujo por donde se recibe el tráfico simulado. Este tráfico pasará a una cola receptora, que enviará el tráfico a nivel MAC.

El proceso MAC tiene implementadas las funciones de la capa de enlace y se encarga de las siguientes funciones:

- Rastreo inicial: la estación base detecta clientes cercanos a ellas que se quieren conectar y los almacena.
- Asigna CIDs de los diferentes clientes de las diferentes conexiones.
- Comprueba el tipo de scheduler de una conexión.
- Se comunica con la capa superior, ARP.
- Envía y recibe los paquetes al nivel físico.

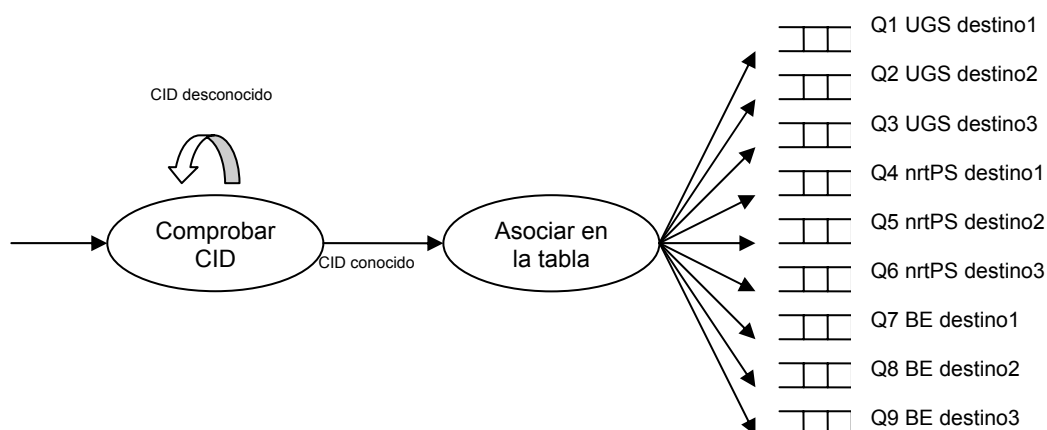
Como el objetivo es separar el tráfico según el tipo de scheduler, en este proceso es donde encontramos las funciones necesarias para obtener el tipo de scheduler y los CIDs de las conexiones.

### 6.2.5.- Solución a implementar

Como ya hemos comentado, se trata de recibir un paquete, obtener su CID, después ver si éste está asociado a una tabla y reenviarlo a su cola según el tipo de scheduler y su destino.

En apartados anteriores, hemos visto que WiMax dispone de 5 tipos de clases de servicio (UGS, nrtPS, rtPS, ertPS y BE) pero OPNET solo tiene implementadas 3: UGS, nrtPS y BE. OPNET decide juntar las clases “Polling Service”, para que estas tres sean tratadas de la misma forma, puesto que no hay gran diferencia entre ellas.

Para cumplir nuestro objetivo, la solución que hemos adoptado es la que se explica en el siguiente diagrama de estados.



**Fig.6.8.** esquema de solución aportada

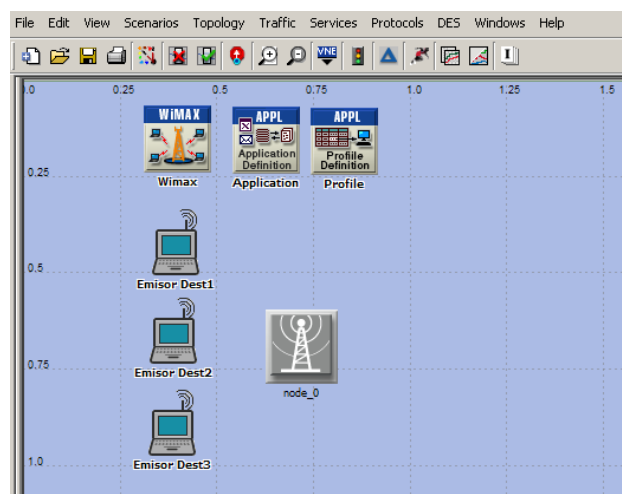
En nuestro caso, los destinos son tres, que corresponden a los tres primeros nodos OBS de tres redes OBS distintas, y como disponemos de tres clases de calidad de servicio (scheduler), obtenemos las nueve colas que salen representadas.

En nuestro diagrama podemos ver que la fase de implementación constará de tres partes fundamentales:

- Obtener un paquete.
- Almacenar en una tabla la relación de dicho paquete, relacionando su CID con su tipo de calidad de servicio y su destino OBS.
- Reenviar el paquete a su cola destino.

### 6.2.6.- Creación del escenario

En este escenario creamos una estación base modificada para redirigir los paquetes en las colas anteriormente especificadas; tres emisores que envían tráfico de los tres tipos de clases a cada destino OBS, un “Wimax Config”, un “Profile Config” y un “Application Config”.

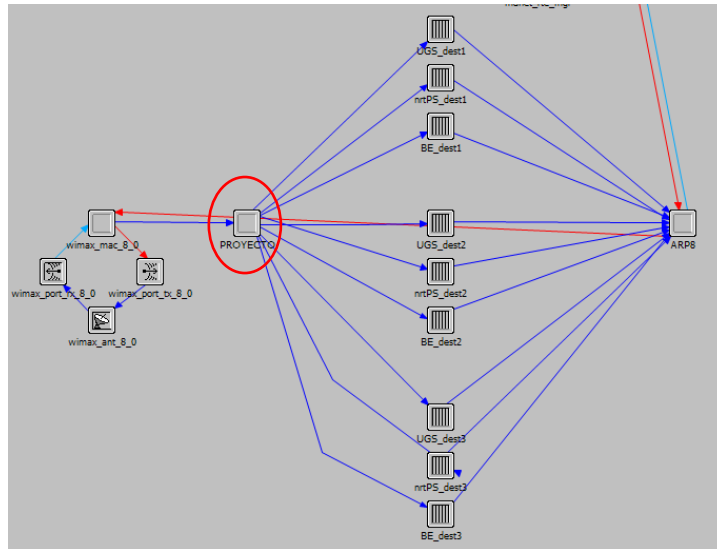


**Fig.6.9.** modelo de proyecto general

#### 6.2.6.1. Modificación de la estación base.

Nuestro objetivo es obtener los paquetes que provienen de la capa MAC para después reenviarlos a sus colas pertinentes.

Dentro del “Node modeler” de la estación base original, hemos realizado los siguientes cambios:



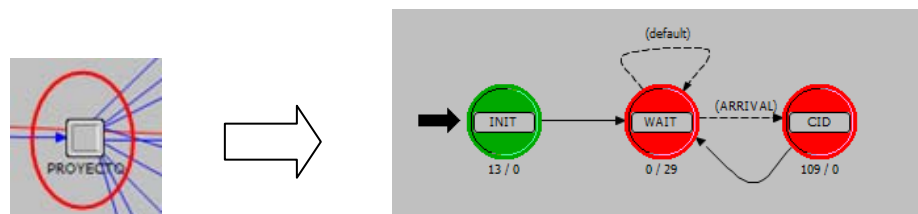
**Fig.6.10.** modelo de procesos diseñado

Hemos introducido a la estación base, un nuevo proceso que hemos llamado “PROYECTO”, el cual será el encargado de redireccionar el tráfico a sus colas de salida. Lo hemos colocado entre las capas MAC e IP. Después de pasar por este proceso, los paquetes son enviados a sus colas y de estas pasamos al nivel de ARP que nos une con el nivel IP.

Ahora veremos como está diseñado el proceso “PROYECTO”.

#### 6.2.6.2 Diseño del proceso PROYECTO

La siguiente figura nos muestra el diagrama de estados del nuevo proceso:

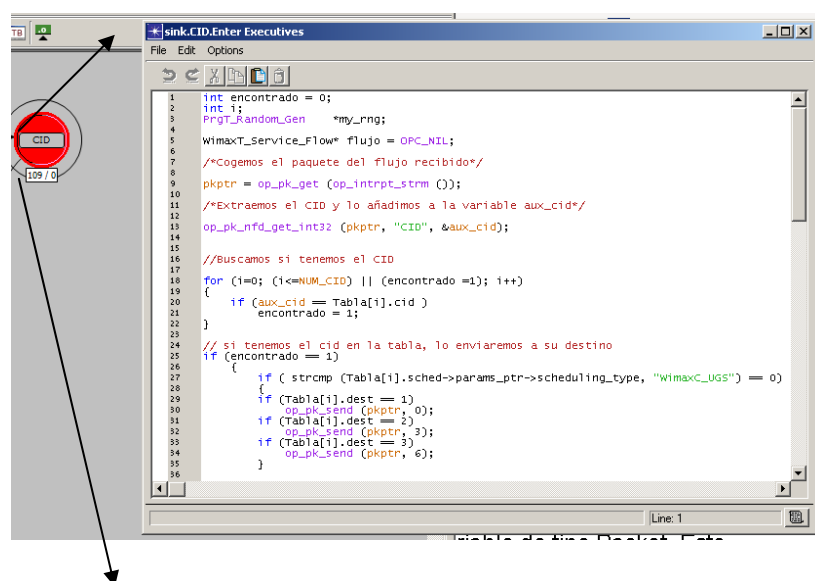


**Fig.6.11.** diagrama de flujo del proceso PROYECTO

Observamos que tenemos tres estados, el primero forzado llamado INIT, y los otros dos no forzados, llamados WAIT y CID.

- El estado INIT inicializa todas las variables necesarias, como el valor de CID, la tabla...
- El estado WAIT, como indica su nombre, está a la espera de la llegada de un paquete. Por defecto, al salir del estado CID volvemos a este estado a la espera de un nuevo paquete. La condición “(default)” indica esta espera, haciendo que se mantenga en este estado.
- El estado CID, se encarga del tratamiento de los paquetes y de su redireccionamiento.





**Fig.6.12.** ejemplo de código de proceso

### 6.2.6.3. Tratamiento de los paquetes

Nuestro primer paso es obtener el paquete, extraer de la capa MAC el CID y el tipo de scheduler que se le ha asociado y asignarle uno de los tres nodos OBS destino.

Para mantener una relación entre los paquetes recibidos y las colas de destino, crearemos una tabla con estos tres índices:

| CID | Scheduler | Destino |
|-----|-----------|---------|
|-----|-----------|---------|

El CID es nuestro identificador de flujo, el cual viene asociado a un tipo de scheduler. Según el nodo OBS a donde transmitan, se le asociará una de las nueve colas de destino.

En el caso de que el CID del paquete recibido no esté almacenado en la tabla, deberemos almacenarlo junto a su tipo de scheduler y la dirección destino que se le asigna.

Si el CID del paquete recibido ya está en la tabla, se reenviará directamente.

#### - Obtener un paquete

Dentro de la capa MAC de una estación base, encontramos la función que nos permite obtener un paquete y almacenarlo en una variable de tipo Packet. Esto nos permitirá después obtener datos como el CID y el tipo de scheduler.

La función para obtener el paquete es la siguiente:

```
Packet* pkptr
pkptr= op_pk_get (op_intrpt_strm ());
```

Donde *op\_intrpt\_strm ()* es la interrupción que indica que se ha recibido un flujo de tráfico. Se guardará el paquete en “*pkptr*”.

- *Obtener CID*

Obtenemos el CID a partir de la siguiente función, donde indicamos que queremos que se nos guarde en la variable “*aux\_CID*”:

```
op_pk_nfd_get_int32 (pkptr, "CID", &aux_cid);
```

- *Obtener tipo de scheduler*

La otra información necesaria es la calidad de servicio que se le aplica a dicho flujo de datos. Los paquetes que lleguen de ese flujo tendrán el mismo tipo de scheduler.

En vez de obtener el tipo de scheduler, lo que hacemos es ir comparando el campo donde esta almacenado este valor con las tres clases definidas (UGS, nrtPS y BE):

La función de comparación es la siguiente:

```
if ( strcmp (Tabla[i].sched->params_ptr->scheduling_type, "WimaxC_UGS") == 0)
```

El único campo a cambiar en los “string compare” es “*WimaxC\_UGS*” por “*WimaxC\_nrtPS*” o por “*WimaxC\_Best\_Effort*”.

- *Almacenar en tabla*

Una vez obtenidos los dos parámetros anteriores, hemos de ver si el CID es existente en la tabla o no. Si no lo fuese, actualizaríamos la tabla con el nuevo CID, para que posteriormente si llega otro paquete del mismo flujo lo redireccionemos mirando la tabla.

- *Reenviar paquete*

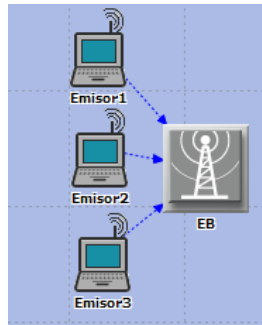
Cuando tenemos el paquete asociado a una de nuestras nueve colas de salida, solo nos falta reenviarlo a una de éstas. Para ello utilizaremos la siguiente función:

```
op_pk_send (pkptr, x);
```

Donde “*x*”, puede tener los valores de 1 a 9. Indicando así cual es la cola de salida a la que se ha de enviar.

## 6.2.7. Resultados

Una vez ya se ha creado la topología de red con la estación base modificada, vamos a comprobar los resultados que podemos obtener inyectando tres tipos de tráfico desde tres emisores a la estación base.

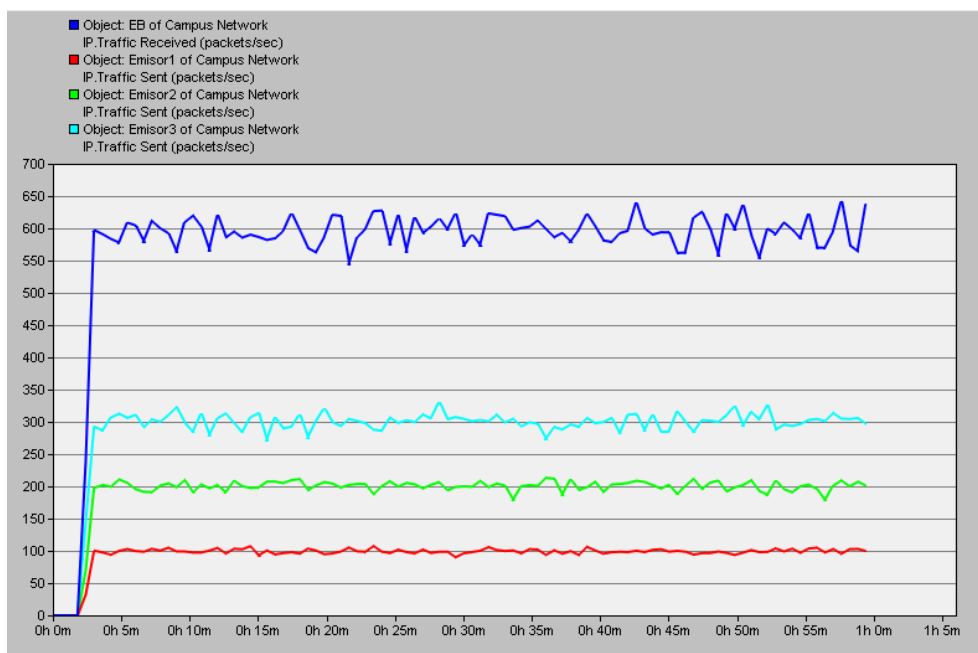


**Fig.6.13.** diagrama general con tráficos asignados

De esta simulación, queremos ver el comportamiento del tráfico Wimax e IP. El objetivo es ver si los flujos de tráfico llegan a las colas creadas de la estación base, ya que en un futuro estas colas se conectarán a la red EPON.

Obtenemos resultados a dos niveles, a nivel IP y a nivel WiMax MAC.

- Tráfico IP: A nivel IP podemos observar que el tráfico que envían los suscriptores llega a la estación base en las siguientes gráficas:

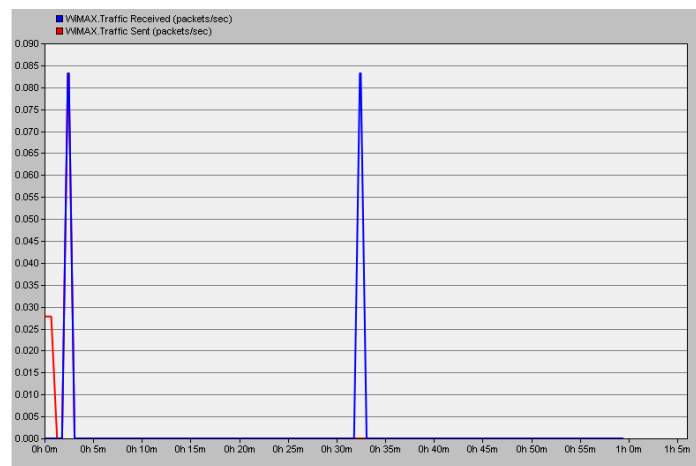


**Fig.6.14.** resultados obtenidos a nivel IP

Como observamos en la gráfica, el emisor1 (color rojo) envía tráfico Best Effort de 100 paquetes/s, el segundo emisor (en verde) envía tráfico nrtPS de 200 paq/s y el último emisor (turquesa), envía un volumen de tráfico tres veces mayor que el primer emisor con calidad de servicio UGS.

Como era de esperar la suma de estos tráficos es lo que recibe nuestra estación base WiMax, tal y como se muestra en la gráfica de color azul.

- Tráfico WiMax: una vez hemos visto que el tráfico IP llega a la estación base, observamos el tráfico a nivel MAC. Los resultados son los siguientes:



**Fig.6.15.** resultados obtenidos a nivel WiMax

En color rojo podemos ver el tráfico enviado por la estación base a nivel WiMax, y en azul, el recibido en esta capa.

Los resultados que esperábamos obtener serían algo parecido al obtenido a nivel IP, ya que, supuestamente, la estación base envía y recibe tráfico tanto a nivel MAC primeramente, y después a nivel IP mientras dura la comunicación.

Sin embargo a la vista de las gráficas, este tráfico puede deberse al *ranging* inicial para establecer las conexiones con los nodos cliente. El siguiente pico, se puede deber al mantenimiento que hace la estación para comprobar qué suscriptores están unidos a ella.

## 6.2.8. Conclusiones

Con los resultados obtenidos, podemos llegar a distintas conclusiones.

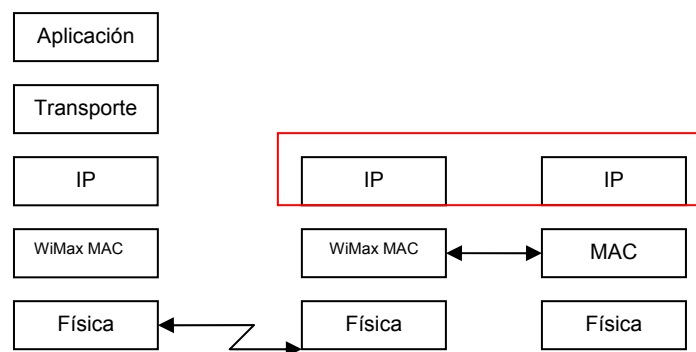
A nivel WiMax MAC no existe ninguna variable o estadística que nos permita ver el volumen de tráfico que hay a este nivel. Desconocemos el comportamiento que tiene la estación base con los suscriptores, ya que los resultados obtenidos no reflejan que haya un establecimiento y envío de tráfico continuo a través de WiMax.

Después de varias simulaciones, todos los resultados obtenidos a nivel MAC son iguales, y no hay documentación que indique a qué pueda deberse dichos resultados.

Debido a que a este nivel no podemos obtener resultados, no podemos comprobar que los paquetes pasen a través de su cola correspondiente antes

de llegar a la capa IP. Aunque sabemos por las gráficas IP que el tráfico llega a su destino. No hemos encontrado en OPNET alguna herramienta que nos permita comprobar la cantidad de paquetes que pasan a través de nuestras colas creadas.

Hay que tener en cuenta que los paquetes que llegan a nuestras colas, son paquetes en formato WiMax. Para transmitir a la EPON, son necesarios paquetes de tramas Ethernet, por lo que esto nos lleva a reestructurar nuestro estudio para hacer el tratamiento de paquetes a capas superiores como mostramos a continuación:



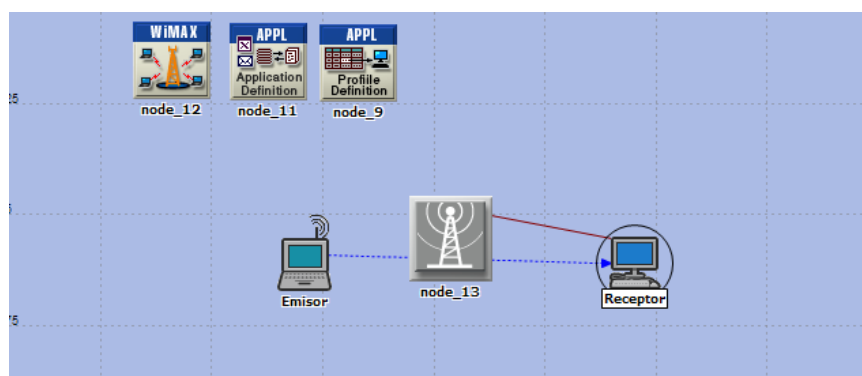
**Fig.6.16.** modelo de capas

En el siguiente escenario se explicarán las modificaciones que vamos a hacer para poder dividir igualmente el flujo en las 9 colas de salida, pero esta vez, los paquetes serán tratados a nivel IP, ya que deseamos enviar tramas ethernet a los nodos OBS.

### 6.3.- Tercer escenario

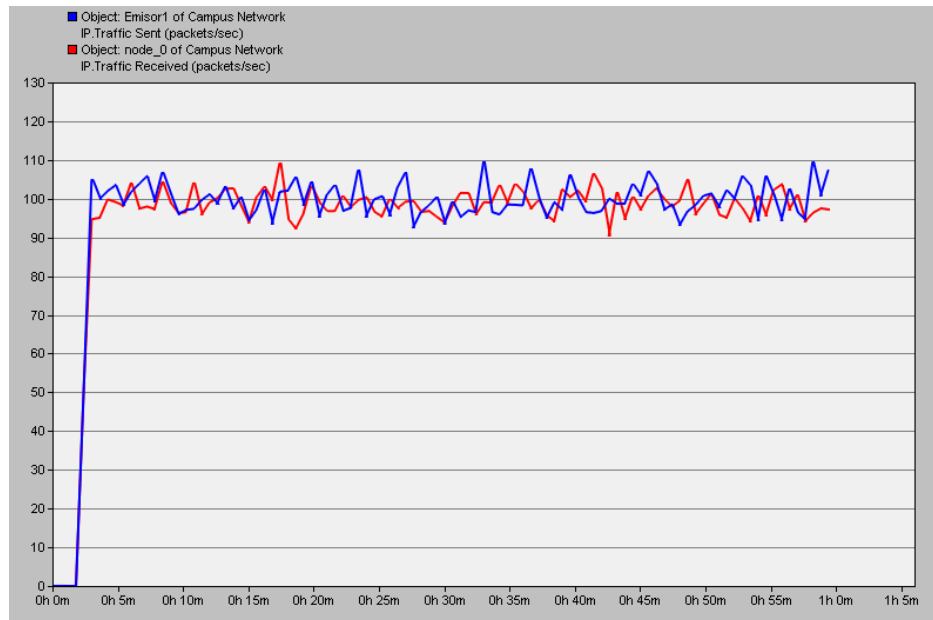
Antes de pasar al tercer escenario, hemos probado si la estación base va a poder enviar el tráfico de un suscriptor inalámbrico a un receptor conectado por un cable ethernet.

Para ello se ha diseñado el siguiente modelo de red:



**Fig.6.17.** topología de red

Como observamos en la línea azul discontinua, el emisor envía un flujo de 100 paquetes por segundo al receptor. Estos paquetes llegan a la estación base, la cual los reenvía por su ethernet conectada al receptor a partir de un cable 1000BaseX, que trabaja a la misma velocidad que las redes EPON. Los resultados obtenidos son:



**Fig.6.18.** resultados obtenidos a nivel IP

La gráfica resultante es satisfactoria, puesto que todos los paquetes que se envían (en azul), se reciben (en rojo).

El objetivo, como ya se ha explicado, era comprobar que existe la transmisión de datos entre terminales inalámbricos y terminales conectados a la estación base mediante cable. A partir de aquí, nuestro objetivo es simular que los interfaces ethernet son nuestras colas de salida.

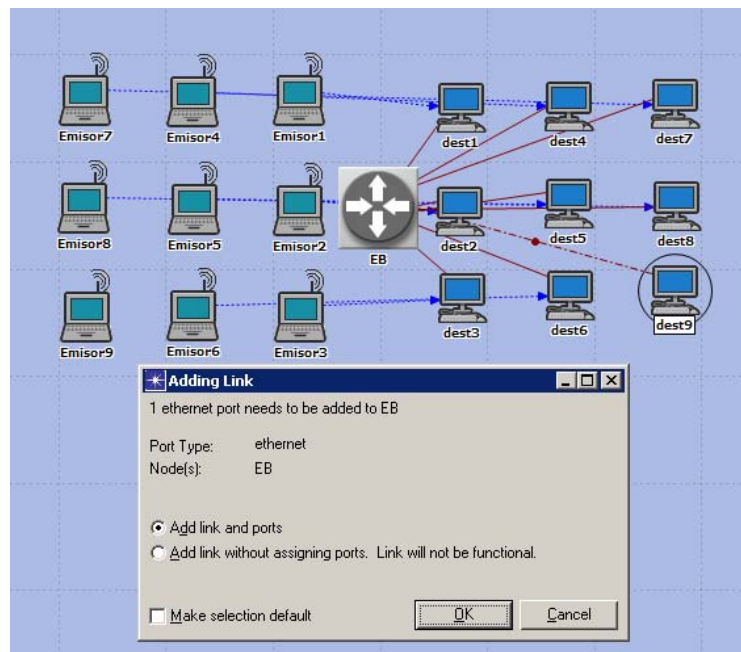
Crearemos un nuevo escenario formado por nueve emisores que enviarán distintos flujos de tráfico a la estación base. Creamos nueve receptores conectados a la estación base mediante puertos Ethernet para simular que son nuestras nueve colas de salida.

### 6.3.1 Creación del nuevo escenario

#### 6.3.1.1 Adición de un puerto

Para el nuevo escenario, necesitaremos una estación base WiMax que disponga de nueve puertos Ethernet. OPNET ha desarrollado una estación base con ocho puertos Ethernet, ocho puertos ATM, etc. Esta será la que utilizaremos en nuestro escenario, con el objetivo de añadir un nuevo puerto Ethernet.

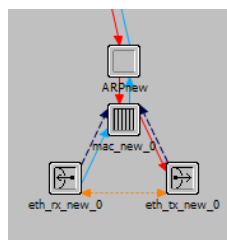
Nuestro objetivo será crear la siguiente red:



**Fig.6.19.** adición de un puerto

Como podemos observar a partir de la imagen, para añadir una nueva interfaz ethernet a la estación base, podemos hacer de forma directa incluyendo el “dest9” y conectándolo por cable. Después de hacer una simulación nos dimos cuenta que este método no es posible, tenemos problemas de compilación.

Entonces nos dedicamos a entrar en el modelo de procesos de la estación base añadiendo la interfaz:



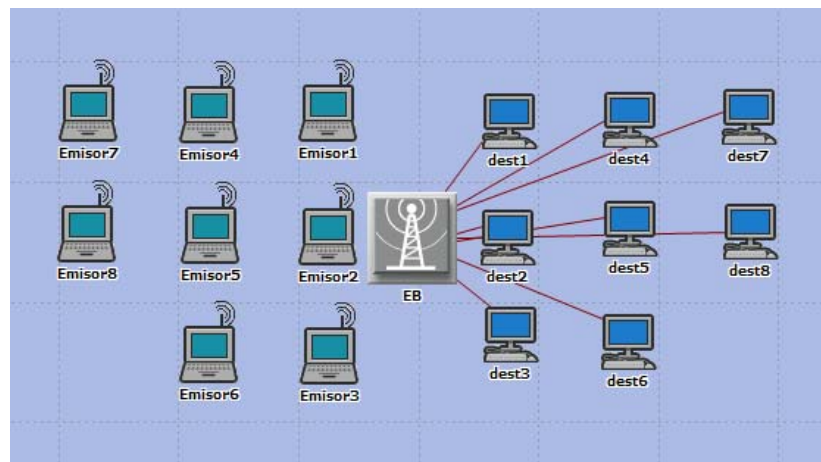
**Fig.6.20.** modelo de procesos del puerto Ethernet añadido

Este puerto Ethernet es igual que el resto. Está formado por un transmisor y un receptor unidos a la capa MAC. De la capa MAC, pasa a un proceso ARP y de aquí, a nivel IP.

Al hacer esto, seguimos teniendo problemas al compilar el modelo. El problema que presenta el nodo creado por OPNET es que, a pesar de que te

permita añadir un nuevo puerto (como podemos ver en el primer gráfico), o crearle otro nuevo al nodo directamente, da errores de código que indican que la estación base no reconoce el nuevo puerto. Esto se debe a que el código contiene variables fijas que no dejan cambiar el número de puertos de la estación base, por lo que se concluye en que es un nodo no escalable.

Para poder seguir con las pruebas a nivel IP, decidimos crear ocho colas de salida conectadas a los ocho puertos Ethernet que contiene la estación base, obteniendo un escenario como el que se muestra a continuación.



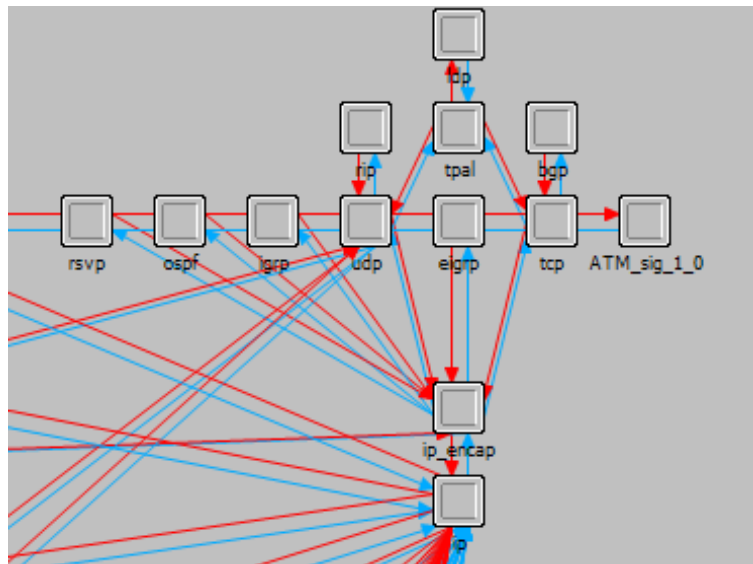
**Fig.6.21.** nueva topología de red con tecnología Ethernet

### 6.3.1.2 Encaminamiento del tráfico

Nuestro siguiente paso es modificar la estación base para poder decidir porque puerto Ethernet se ha de enviar el tráfico según su destino OBS y su calidad de servicio. Para ello, estudiaremos la implementación de la estación base.

La estación base está formada por procesos de nivel de red accediendo a nivel IP y este, a capas superiores.





**Fig.6.22.** modelo de procesos de la capa IP de la estación base

El proceso IP solamente se encarga de comprobar los distintos tipos de interrupciones que recibe y pasar paquetes a un nivel inferior o superior. No hace ningún tipo de procesos.

Al enviar paquetes a un nivel inferior, el proceso IP envía el paquete al puerto que le indican las capas superiores.

Al enviar paquetes al nivel superior, el paquete lo recibe un proceso que desencapsula el paquete IP y lo envía a los protocolos de enrutamiento del nivel superior. Son estos protocolos de enrutamiento los que deciden por qué puerto tendrá que salir el paquete de la estación base. Estos protocolos de enrutamiento se escogen de forma predefinida por el programa para hacer que lleguen los paquetes de un origen a un destino.

En conclusión, no podemos modificar la estación base para que se comporte como en el escenario dos y nos permita asociar un tipo de *scheduler*, un destino OBS con un puerto de salida en concreto.

#### 6.3.1.3 Diferenciación de los tipos de scheduler

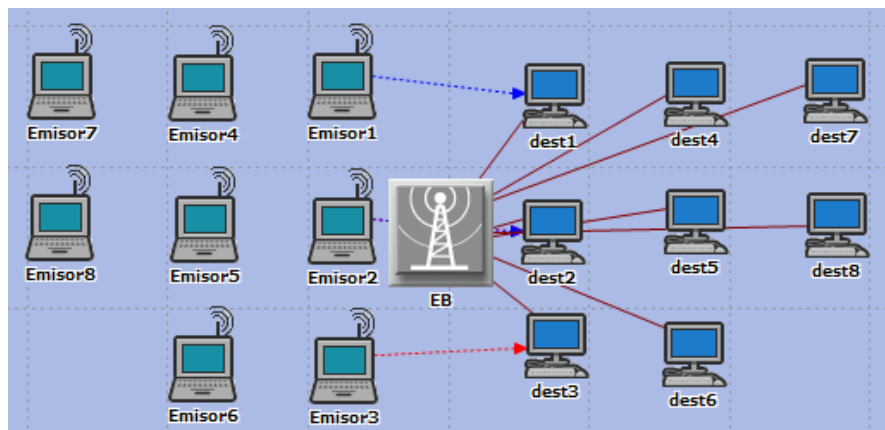
En los apartados anteriores hemos comprobado que no podemos encaminar el tráfico al puerto que deseemos y que no podemos añadir nuevas interfaces Ethernet. Nuestra siguiente opción será crear flujos de tráfico de distintas clases de servicio a un destino concreto, emulando así el encaminamiento que las capas superiores no nos han permitido hacer.

Queremos comprobar que la estación base trata de forma distinta las tres calidades de servicio de las que disponemos en OPNET.

Debido a que no podemos obtener estadísticas que nos permitan diferenciar el tratamiento que se da al tráfico según el tipo de scheduler que

tenga asignado (UGS, nrtPS y BE), tal y como hemos visto en el primer escenario, lo que haremos será crear tráfico hasta saturar el canal WiMAX. Al saturar el canal, el tráfico más prioritario, UGS, deberá llegar a su destino; mientras que el tráfico menos prioritario, BE, deberá de sufrir pérdidas en los paquetes.

En este escenario podemos ver que los emisores, 1, 2 y 3 envían tráfico a un destino en concreto:



**Fig.6.23.** flujos de tráfico

Hemos creado cuatro flujos:

- El emisor 1 envía 500Mbps en 10000paq/s de UGS.
- El emisor 2 envía 50Mbps en 10000paq/s BE, empezando a mitad de la simulación.
- El emisor 2 envía otros 100Mbps en 10000paq/s UGS, empezando a la mitad de la simulación.
- El emisor 3 envía 1Gbps en 20000 paq/s BE.

La simulación será de 20 minutos. Durante los primeros 10 minutos, la estación base recibirá un flujo de 30000 paquetes/s, y los 10 minutos restantes recibirá 50000 paq/s.

El resultado esperado será ver que al inyectar tráfico BE, el tráfico BE sufra pérdidas, ya que, al saturar el canal a estas elevadas tasas, el tráfico UGS será prioritario.

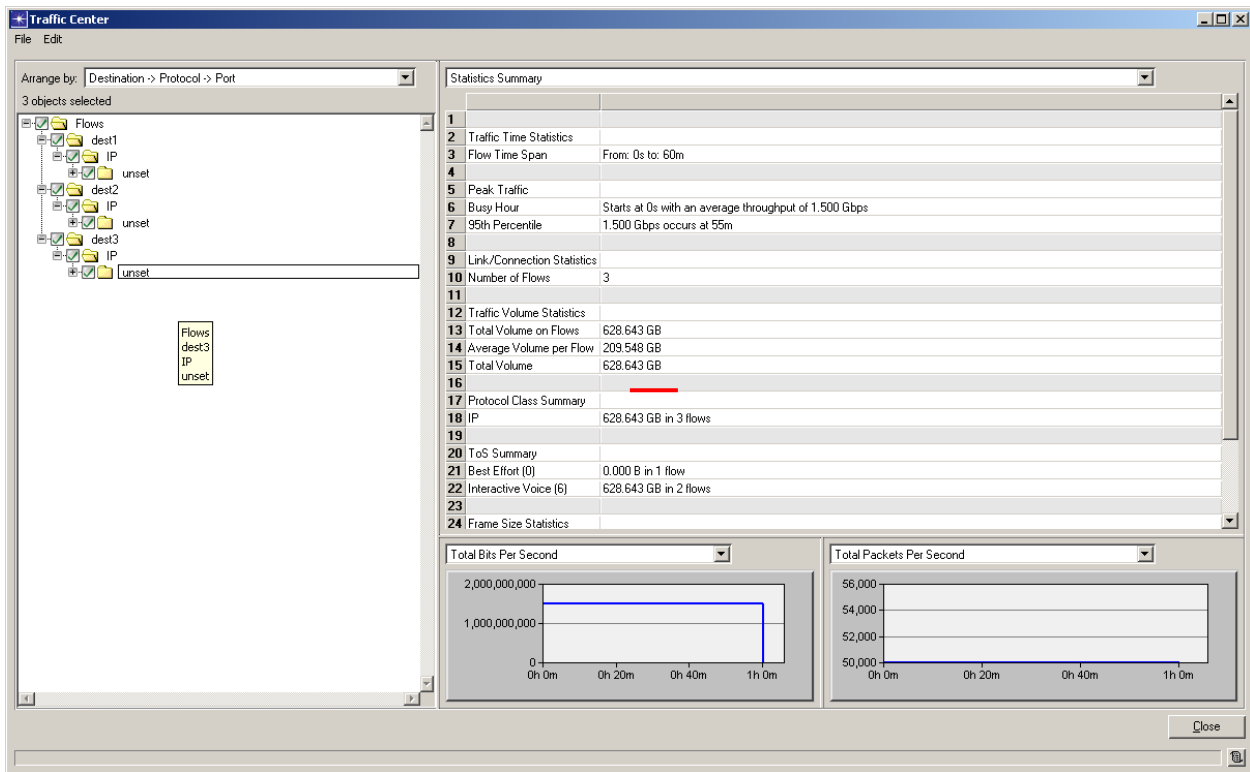


Fig.6.24 Traffic center

### 6.3.2 Resultados

En primer lugar vamos a ver el tráfico que recibe y reenvía la estación base.

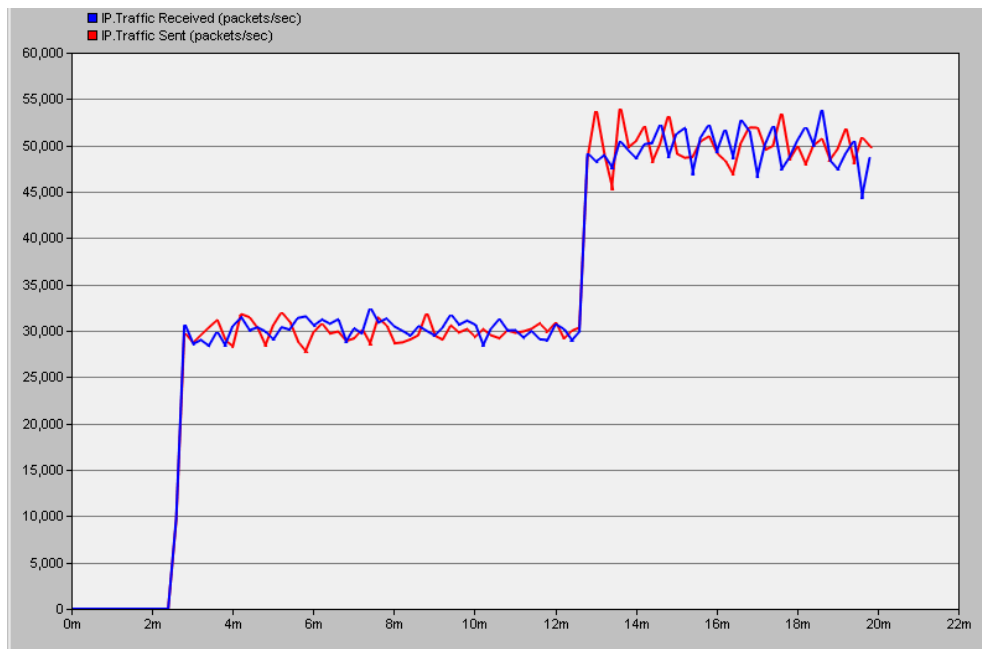
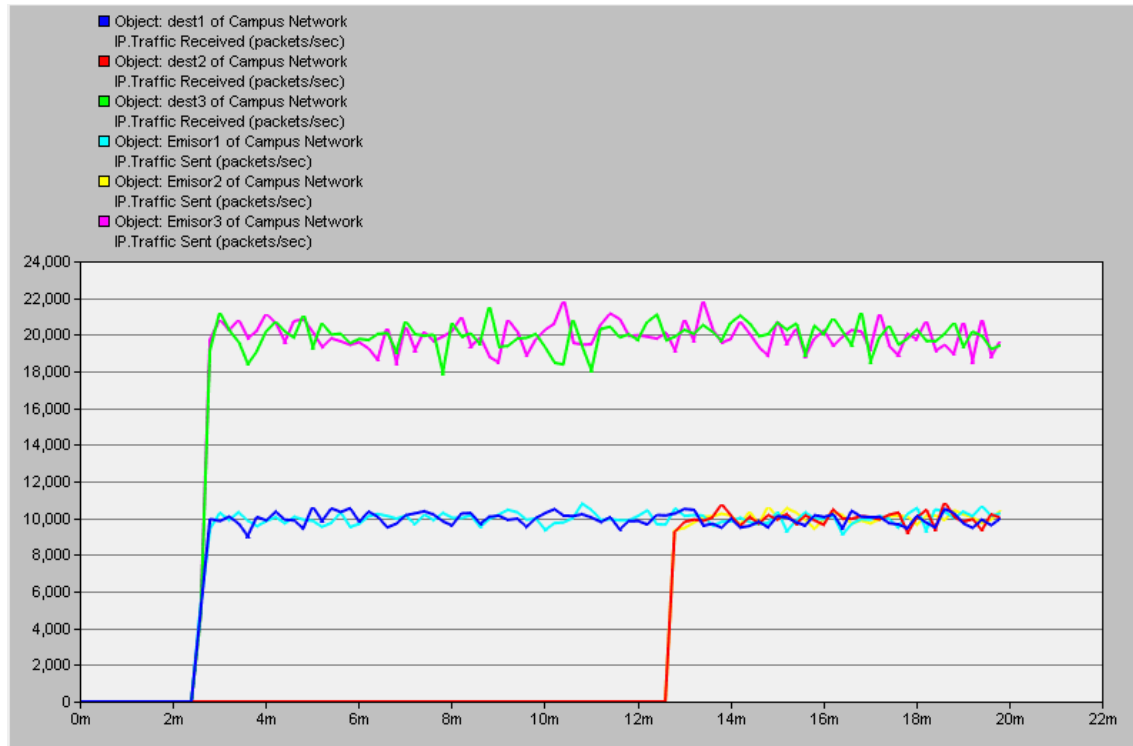


Fig.6.25. gráfica obtenida en la estación base

En el gráfico podemos ver que la estación base recibe todo el tráfico, lo procesa y lo reenvía a sus destinos.

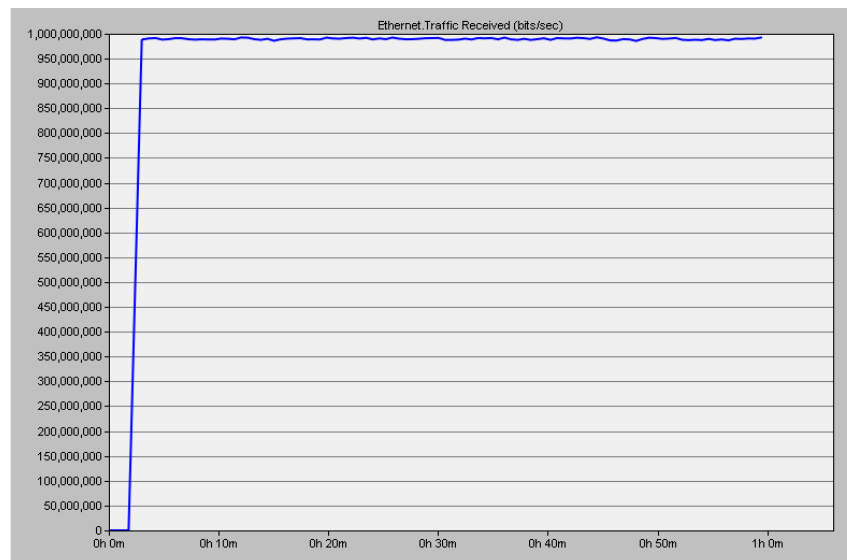
En el siguiente gráfico se comparan los flujos recibidos por los destinos, para comprobar si ha habido pérdidas en los flujos de menos prioridad.



**Fig.6.26** gráfica obtenida de los flujos

En este observamos que todos los nodos destino reciben la misma cantidad de tráfico, sin haber pérdidas ni distinciones entre tipos de scheduler.

Por último, vamos a ver el tráfico recibido a nivel Ethernet en un destino.



**Fig.6.27** tráfico ethernet

En este caso, podemos ver que el tráfico queda limitado a poco menos de un 1Gbps. Esto se debe a la limitación del cable Ethernet 1000BaseX, que tiene un ancho de banda máximo de 1Gbps.

#### 6.3.1.5 Conclusiones

En el primer resultado hemos visto que no podemos saturar el canal WiMAX. La estación base recibe, procesa y reenvía todo el tráfico, a pesar del elevado volumen de este. Por lo tanto podemos decir que la implementación de WiMax no se comporta de la forma esperada, ya que procesa tasas de más de 1 Gbps.

En segundo lugar, vemos que todos los destinos reciben la misma cantidad de tráfico que se les envía. La estación base no trata con prioridad al tráfico que tiene calidad de servicio UGS que debería disponer de más prioridad. En ningún destino hemos visto que el tráfico Best Effort haya sufrido pérdidas.

Por último, vemos que el tráfico recibido a nivel Ethernet en los destinos es de 1Gbps. Esto se debe a la limitación del canal del cableado Ethernet de 1Gbps.

Como conclusión final, vemos que WiMax desarrollado por OPNET, tiene implementaciones para el tratamiento de diferentes *schedulers*, cosa que no hemos podido comprobar en nuestras simulaciones. Esto se puede deber a que no sabemos si la herramienta de tráfico que utilizamos es la adecuada para esta tecnología.

WiMAX no dispone de una capacidad concreta del ancho de banda y del canal que siga las especificaciones reales, en diferencia a otras tecnologías implementadas en OPNET.

## Conclusiones

OPNET es un simulador potente que permite al usuario trabajar con diferentes tecnologías ya implementadas creando todo tipo de escenarios y obteniendo resultados reales. Además, permite desarrollar e implementar de forma más o menos sencilla nuevos elementos de red, nuevos protocolos, paquetes, etc., para después poder comprobar que serían válidos en un escenario real.

A pesar de ello, la tecnología WiMax implementada por OPNET no provee a los escenarios todas sus características reales. Como dificultad, se le suma la escasa documentación que podemos encontrar de dicha tecnología.

En el desarrollo de los tres escenarios se pretende comprobar la funcionalidad de los nodos y herramientas de WiMax implementadas por OPNET. Los resultados obtenidos concluyen en que los nodos desarrollados por OPNET no implementan de forma real la eficiencia, el ancho de banda del canal, las capacidades ni las calidades de servicio que ofrece el protocolo estandarizado de WiMax. En el tercer escenario, comprobamos que la estación base de WiMAX es capaz de soportar tasas mayores de tráfico de 1Gbps, mientras que en la realidad tiene capacidad de hasta 75Mbps.

Hemos comprobado que WiMax no tiene implementadas estadísticas que nos permitan diferenciar distintos flujos de tráfico de diversos orígenes. Vemos que a nivel WiMax, el tráfico no sufre pérdidas, ya que un nodo y una estación base es capaz de enviar, procesar y recibir una cantidad de tráfico de tasas elevadísimas.

Por otra parte, hemos podido comprobar que otras tecnologías que hemos utilizado, tanto en tutoriales, como la tecnología Ethernet utilizada en el tercer escenario sí que permiten obtener resultados coherentes acordes a escenarios reales.

## **Valoración personal**

Como punto final a las conclusiones, queremos aportar nuestra propia valoración en la realización de este proyecto.

En primer lugar, valoramos el haber formado parte de un proyecto amplio y ambicioso sobre WiMax. Ha sido interesante el estudio de esta nueva arquitectura de red de acceso al usuario.

En la realización del proyecto hemos encontrado algunas dificultades relacionadas con la utilización de WiMax dentro del entorno OPNET. Al iniciar el proyecto, desconocíamos que para poder trabajar con los nodos y herramientas implementadas por OPNET sobre esta tecnología fuera necesario tener una licencia específica. La obtención de esta licencia provocó una demora de varios meses a la realización de nuestro proyecto.

A esto, se le suma la escasa información que hay sobre la utilización de este programa. El soporte que se puede obtener depende, mayoritariamente, de la documentación propia del fabricante. Además, a nivel WiMax, OPNET aporta poca información en base a la utilización y manejo de las herramientas WiMax.

Al ponernos en contacto con el soporte de OPNET, la única respuesta obtenida es que, si no disponemos de un contrato de mantenimiento, podemos obtener más información únicamente con los modelos contribuidos por otros usuarios.

## Bibliografía

- [1] Ton Koonen, "Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When?", Proceedings of the IEEE Vol .94 No. 5., mayo de 2006.
- [2] G. Kramer, B. Mukherjee, A. Maislos, "Ethernet Pasive Optical Networks", Mc Graw-Hill Professional Engineering. 2005.
- [3] Christian Hoymann, "Analysis and performance evaluation of the OFDM-based metropolitan area network IEEE 802.16". Computer Networks vol.49, 341-363. 2005.
- [4] OPNET, "Wireless 802.16", OPNET Tutorials  
[www.opnet.com](http://www.opnet.com)
- [5] Loufth Nuaymi, "WiMAX technology for Broadband Wireles Access", Ed. Wiley, 2007
- [6] Referencia a "Fi-Wi de la red de excelencia Euro-NF"  
<http://www.euronf.org>
- [7] D. Remondo, M. Nunes, S. Sargento, M.Cesana, I. Filippini, J. Triay, A. Agustí, M. De Andrade, Ll. Gutiérrez, S. Sallent C. Cervelló-Pastor. "Integration of Optical and Gíreles Technologies in the Metro-Access: QoS Support and Mobility Aspects", Aceptaco para publicación en Proc. De NGI 2009, 5<sup>th</sup> Eur-NGI Conference on Next Generation Internet Networks, 1-3 Julio, Aveiro, Portugal.