



Jornadas In-Red 2014
Universitat Politècnica de València
Doi*****

Laboratorio Virtual Interactivo y Portable para el Estudio de Calidad de Servicio en Redes de Comunicaciones de Siguiete Generación (NGN)

Angel Gomez-Sacristan^a, Víctor M. Sempere Paya^b, Miguel A. Rodriguez-Hernandez^c

^aDCOM, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain. agomez@com.upv.es

^bITI, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain. vsempere@com.upv.es

^cITACA, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain. marodrig@upvnet.upv.es

Abstract

Virtual Labs based on advanced simulation tools play an important role during student learning. The experimentation capacity and flexibility in the simulation hypotheses contribute to a better understanding of complex technologies using a graphical environment. Arbitrary systems can be designed, and with relative ease, measure their performances with changes as equipment and links capacity, traffic type, congestion control mechanisms, etc. This work describes a virtual lab developed for learning telecommunication Next Generation Networks (NGN) based on Metro-Ethernet Access Technologies.

Keywords: *Virtual laboratory, communication engineering education, NGN, QoS, MetroEthernet*

Resumen

Los Laboratorios Virtuales basados en herramientas avanzadas de simulación desempeñan un importante papel como facilitadoras del aprendizaje del alumno. La capacidad de experimentación que aportan y la flexibilidad en las hipótesis de simulación contribuyen a la mejor comprensión de tecnologías complejas bajo un entorno gráfico. Pueden diseñarse sistemas arbitrarios, y con relativa facilidad, evaluar su comportamiento ante cambios como capacidad de enlaces y equipos, naturaleza del tráfico, mecanismos de control de congestión, etc. Este

trabajo describe un laboratorio virtual desarrollado para el aprendizaje de Redes de Telecomunicaciones de Siguiete Generación basadas en tecnologías de acceso Metro-Ethernet.

Palabras clave: *Laboratorio virtual, ingeniería de telecomunicaciones, redes de nueva generación, calidad de servicio, MetroEthernet*

1. Introducción

La enseñanza en las Escuelas de Ingeniería, especialmente en aquellas relacionadas con las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones, donde el dinamismo y la innovación son continuos, se enfrenta a retos importantes. La evolución del modelo de aprendizaje, mayor peso de la actividad de laboratorio, requiere inversiones en equipamiento específico, en muchos casos inasumibles y en poco tiempo obsoletas. Por otra parte las nuevas tendencias docentes implican una participación más activa y autónoma del alumno durante el proceso de aprendizaje. Para conseguir los anteriores objetivos se presenta en este trabajo un laboratorio virtual dentro del ámbito de las telecomunicaciones que permite simular sistemas novedosos con una participación activa del alumno.

En los laboratorios virtuales de simulación, los sistemas y dispositivos reales son sustituidos por ordenadores que ejecutan los simuladores adecuados. Las redes de telecomunicación son sistemas en los que el número de elementos puede ser muy elevado y con grandes distancias entre ellos. Por ello, en muchos casos, la capacidad de experimentación sobre elementos reales por parte del alumno es imposible teniendo que recurrir a soluciones alternativas. En los laboratorios virtuales la capacidad de experimentación es alta debido a la flexibilidad en las hipótesis simulación, además los estudiantes suelen valorar positivamente los resultados obtenidos. Por lo tanto, simulación y laboratorios virtuales son una buena solución para la enseñanza en Ingeniería.

Para la implementación de los laboratorios virtuales se pueden tener en cuenta dos posibilidades. La primera consiste en plantear la realización de una plataforma de simulación con acceso vía internet donde el estudiante pueda trabajar de forma totalmente independiente y con acceso desde cualquier punto con conexión a internet, este es el modelo propuesto en (Marqués 2006). Un segundo planteamiento consiste en implementar el entorno de simulación dentro de una sala con ordenadores dentro de las dependencias de la universidad, como plantea (Dobrilovic, 2012). El laboratorio con acceso universal desde cualquier punto con conexión a internet es muy flexible e independiza los horarios de

estudio de los alumnos, sin embargo, el alumno pierde la ayuda personalizada e inmediata del profesor para la resolución de problemas y dudas. Cuando el objeto de aprendizaje tiene un cierto grado de complejidad, es conveniente la presencia de un profesor que guíe de forma local al estudiante. En el laboratorio local se tiene al profesor pero sin embargo el alumno pierde la posibilidad de experimentar fuera de un horario predeterminado.

Con el fin de compatibilizar autonomía del estudiante y ayuda por parte del profesor, el presente trabajo plantea una práctica que se divide en varias etapas. La etapa inicial se realiza en un aula de ordenadores con presencia simultánea de estudiantes y profesor, donde los alumnos cuentan con ayuda para resolver sus dudas. La segunda etapa se realiza de forma autónoma por los alumnos y desde cualquier ordenador. Para hacer posibles estas dos etapas ha sido necesario realizar el laboratorio virtual sobre una sala con ordenadores en el recinto universitario, pero sobre un simulador de libre distribución que permite al estudiante la posibilidad de instalación en su ordenador personal. El software elegido para el desarrollo del laboratorio virtual ha sido el simulador de redes Omnet++. (OMNET)

Las redes de nueva generación (Next Generation Network, NGN) (ITU-T Y.2001), evolución de las redes existentes de voz, datos y multimedia, son objeto de estudio en la formación de los futuros ingenieros. A diferencia de las redes de telecomunicaciones clásicas, en NGN, servicios y aplicaciones de muy diferente naturaleza comparten recursos de una infraestructura común. Por ello es necesario introducir en la red mecanismos de gestión de tráfico que garanticen para cada uno de los servicios subyacentes el mantenimiento de los objetivos de calidad recogidos en las recomendaciones internacionales (ITU-T Y.2111, Y.2112).

El ecosistema Ethernet se está convirtiendo en un estándar de facto en entornos empresariales e industriales por sus características de sistema abierto, ubicuidad, mayor flexibilidad y menores costes. Servicios tradicionales incluidos voz, datos y multimedia, además de otros dispositivos de control y monitorización, como sensores y redes industriales, convergen hacia esta arquitectura

Con el cambio de paradigma que representa NGN, y la presencia ubicua de Ethernet, las redes de acceso basadas en esta tecnología, como Metro Ethernet (Metro Ethernet Forum) constituyen hoy el método preferido por muchas empresas para soportar todos los servicios de telecomunicación que requieren para sus procesos de negocio.

En un escenario real, múltiples fuentes y tráfico heterogéneo (isócrono para tráfico de voz, de tasa variable para servicios de vídeo, asíncrono para tráfico de alarmas, best-effort, etc.) con diferentes necesidades de latencia, pérdida de paquetes y jitter, compiten por un ancho de banda.

Los estándares MetroEthernet permiten la definición de diferentes mecanismos para priorizar unos tráficos sobre otros (Metro Ethernet Forum), pero describir analíticamente el comportamiento de un interfaz de estas características es una tarea compleja. Sin embargo, simular escenarios MetroEthernet con fuentes de tráfico configurables y evaluar su respuesta ante diferentes variaciones de parámetros relevantes, puede contribuir a una mejor comprensión por parte del alumno de estos mecanismos y facilitar su aprendizaje.

El objetivo de este trabajo es describir una herramienta de simulación desarrollada para facilitar a los alumnos una mejor comprensión de los mecanismos relacionados con la Calidad de Servicio en redes MetroEthernet, así como los resultados obtenidos con ella, tanto desde el punto de vista de simulación de sistemas de comunicaciones como de los resultados de aprendizaje obtenidos al aplicarlos para la enseñanza.

El Laboratorio Virtual se ha desarrollado sobre el simulador de libre acceso OMNET++. La elección de un entorno abierto y portable para el diseño del Laboratorio Virtual ha permitido construir una metodología de aprendizaje basada en tres ejes: el trabajo autónomo del alumno para comprender aspectos teóricos del problema y el manejo de la herramienta de simulación, la iteración presencial alumno-profesor como referencia y supervisión en la realización de los diferentes experimentos y por último, el trabajo en equipo para compartir experiencias y afianzar los conocimientos adquiridos

La estructura de este paper es la siguiente: En el apartado 2 se describirán los objetivos y la metodología de aprendizaje. En el apartado 3 se explican de forma breve las características del entorno de simulación, Omnet++. En el apartado 4 se describe el laboratorio virtual. El apartado 5 trata sobre las simulaciones que realizan los alumnos con las herramientas previamente descritas. El apartado 6 presenta la evaluación del laboratorio virtual realizada por los alumnos mediante una encuesta de satisfacción tras haber concluido la práctica. Finalmente el apartado 7 contiene las conclusiones del artículo.

2. Objetivos y Metodología de Aprendizaje

La utilización de la herramienta de simulación propuesta requiere que el alumno posea conocimientos suficientes sobre arquitectura y protocolos utilizados en las redes de conmutación de paquetes. La simulación por tanto cubre el aprendizaje práctico de contenidos teóricos que han sido previamente desarrollados en el aula. Este laboratorio virtual forma parte de la asignatura de Redes de Acceso que se imparte en 3º curso de Ingeniería de Telecomunicación en la Escuela de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia.

El primer objetivo que se persigue con este laboratorio virtual es conseguir que el alumno identifique los mecanismos relacionados con la calidad de servicio en redes MetroEthernet,

comprenda su funcionamiento y extraiga conclusiones sobre cada una de los diferentes escenarios disponibles en el entorno de simulación. Un segundo objetivo pero no menos importante, es fomentar el trabajo en equipo, la colaboración e intercambio de ideas entre alumnos-profesor y por último responsabilidad y autonomía.

Para ello, esta práctica de 10 horas de duración, se ha dividido en tres fases diferenciadas. La primera fase consiste en una actividad autónoma del alumno, de unas dos horas de duración, soportado por un documento guía donde se repasa la base teórica con información suficiente para la realización de cada uno de los experimentos, tareas a realizar, hojas de resultados obtenidos etc. La segunda fase, de 4 horas en dos sesiones de laboratorio y grupos de trabajo de dos alumnos, consiste en la realización de un conjunto de tareas-experimentos de dificultad creciente con el soporte in-situ del profesor. La tercera fase, de 4 horas de duración en la que el alumno trabaja de forma autónoma con su propio ordenador y en horario libre, consiste en la realización de experimentos similares sobre un escenario de mayor complejidad. En este caso, el alumno cuenta con la tutoría on-line del profesor.

La verificación de que el alumno ha alcanzado los objetivos del aprendizaje se realiza mediante el análisis de la respuesta del alumno a diferentes cuestiones que se plantean en el manual del laboratorio, hojas de resultados y la evaluación continua del profesor.

Por la complejidad del entorno de simulación y de los propios experimentos, es conveniente la realización de parte de la práctica en el aula de ordenadores de la Universidad con la presencia in situ del profesor que imparte la asignatura para ofrecer soporte y facilitar el aprendizaje de los alumnos. Una vez conseguido que al alumno maneje adecuadamente el entorno, la última parte de la práctica podrá realizarla de manera autónoma. Para ello y entre otras razones, la práctica se ha desarrollado sobre un entorno de simulación abierto (opensource) y portable como es Omnet++.

3. Descripción del Entorno de Simulación

Para la implementación del Laboratorio Virtual se ha utilizado la herramienta OpenSource Omnet++ (Omnet) y elementos de la biblioteca *inet* convenientemente modificados. Se ha seleccionado OMNeT++ por su carácter abierto y gratuito, modularidad, facilidad de integración y experiencia previa de uso en otras tareas de investigación.

OMNeT++ es una herramienta de simulación de eventos discretos ampliamente utilizada en el diseño y evaluación de redes de telecomunicaciones, sistemas complejos de IT, redes de colas y arquitecturas hardware.

Laboratorio virtual interactivo

Un modelo de simulación en OMNeT++ consiste en módulos jerárquicamente anidados que se comunican mediante paso de mensajes. Los módulos activos se denominan módulos simples y su comportamiento se define mediante ficheros escritos en lenguaje C++. Los módulos simples pueden agruparse dentro de otros módulos, llamados módulos compuestos.

En la simulación de redes, los módulos simples pueden representar fuentes de tráfico, entidades de protocolo, dispositivos de red, estructuras de datos como tablas de encaminamiento, etc. Los nodos de red como hosts y routers son ejemplos de módulos compuestos, formados por módulos simples.

Para facilitar el desarrollo rápido de modelos de simulación, existen diferentes bibliotecas con módulos que simulan elementos de red y protocolos. Concretamente, la biblioteca llamada INET (Inet) contiene implementaciones de ciertos equipos y protocolos genéricos. Para el desarrollo del caso de estudio descrito en el presente artículo ha sido necesaria la creación de nuevos elementos funcionales para soportar tramas Ethernet etiquetadas con IEEE 802.1Q (IEEE), así como la modificación y ampliación del código de algunos elementos de la propia biblioteca INET. Un ejemplo del entorno de simulación puede observarse en la figura 1.

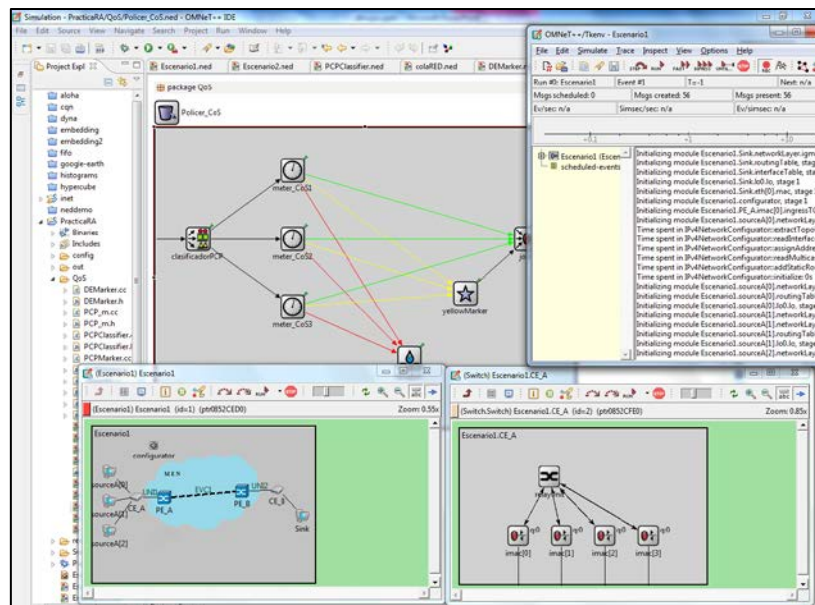


Fig 1. Entorno de Simulación

4. Descripción del Laboratorio Virtual

El escenario desarrollado simula un entorno real de conectividad de una empresa a una red NGN con acceso MetroEthernet. Normalmente existirá un número arbitrario de fuentes de tráfico Ethernet conectadas a un Switch a través de una red local cableada o inalámbrica. Este switch, conocido como "*Customer Equipment*" (CE), realiza las funciones de marcado de tramas en función de la prioridad de cada fuente asignada por el usuario y realizará las funciones de interfaz con la red Metro Ethernet del Operador.

El nodo del Operador, conocido como "*Provider Equipment*" (PE) implementa entre otras, funciones policía, control del uso de recursos, y gestión de colas de salida para garantizar el cumplimiento del contrato de tráfico definido en el EVC (Ethernet Virtual Connection) cuyos parámetros principales son el caudal garantizado (CIR) y el caudal en exceso (EIR). En la figura 2 se observa la topología objeto de estudio.

En el escenario de trabajo propuesto se evalúa el comportamiento de un interfaz UNI (User Network Interface) MetroEthernet. Para ello se ha definido un servicio E-Line (Ethernet Private Line) con una conexión EVC punto a punto entre dos UNIs. Ambas UNIs son de 100Mbps. Por simplicidad para el alumno se han definido tres tipos de fuentes con sus clases de servicio asociadas: voz, vídeo y best effort.

Cada una de estas fuentes, el interfaz UNI, los Ethernet Virtual Connection (EVC), el interfaz de salida, los mecanismos de control de tráfico, así como el tiempo de simulación son totalmente configurables mediante un fichero editable de inicialización

Los experimentos se han organizado para que el alumno pueda analizar el impacto en términos de Calidad de Servicio (pérdida de paquetes, retardo, jitter, efecto de unas fuentes sobre otras y otros aspectos de interés) por modificaciones en el ancho de banda disponible, caudal contratado, y activación de los mecanismos de control de tráfico. Los resultados de los diferentes experimentos se presentan tanto en formato gráfico como tabular para su posterior procesado.

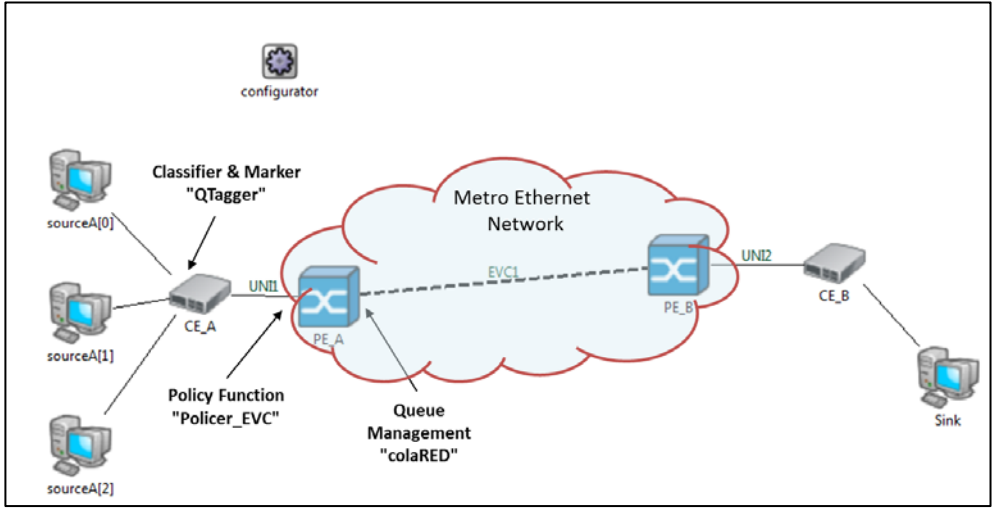


Fig 2. Escenario de Simulación de una Red

Durante la simulación se puede interactuar sobre cuatro bloques funcionales: Fuentes de tráfico, Marcado de tramas, Función policía y Gestión de colas. Las fuentes de tráfico son modeladas a partir del módulo "StandardHost" perteneciente a la biblioteca INET. Se trata de un módulo compuesto que a su vez contiene varios módulos simples, entre los cuales destacan los orientados a la generación de paquetes encapsulados en TCP o UDP. Dichos módulos simples ofrecen la posibilidad de generar flujos de paquetes cuyas características son totalmente configurables gracias a parámetros como el tamaño de los paquetes, el intervalo entre paquetes, duración de ráfagas o periodos de silencio. Se han configurado tres tipos de módulos que simulan tráfico de voz, video y best effort.

Una vez generado el tráfico es necesario identificarlo adecuadamente para que los nodos de la red (PE) sean capaces de diferenciarlos y aplicar las políticas de calidad de servicio apropiadas. Para ello los paquetes generados por cada una de las fuentes se marcan con un determinado valor de prioridad en el campo PCP (*Priority Code Point*) de la etiqueta IEEE 802.1Q.

La función policía es la encargada de comprobar y limitar el ancho de banda que consume cada clase de servicio. Se ha definido una función de policía asociada a cada una de las clases de servicio contratadas. El módulo diseñado para modelar esta función en el escenario de simulación es el módulo "Policer_CoS". Se trata de un módulo compuesto situado en la interfaz de entrada del nodo PE, el cual da acceso a la red del operador. Su funcionamiento está basado en el uso del algoritmo "trTCM" (*two rate Three Color Meter*) en su versión modificada descrita en la RFC 4115 (Aboul-Magd, 2005).

El último paso para la implementación de QoS es la configuración de las colas de salida para ofrecer un tratamiento diferenciado a cada clase de servicio. Esta tarea es realizada por el módulo "colasCoS" situado en la interfaz de salida del nodo PE_A. En él se clasifica el tráfico entrante en tres clases de servicio con una cola asociada a cada una de dichas clases.

5. Simulación y Resultados

5.1. Simulación de la Red sin Calidad de Servicio

En este bloque se realizan 10 experimentos de creciente dificultad con el objetivo de que el alumno comprenda los efectos sobre el sistema producidos por variaciones de las características de las fuentes de tráfico, la longitud de las colas, el caudal contratado, etc.

El alumno debe configurar el escenario de simulación para cada experimento editando el fichero de inicialización del entorno de simulación con ciertos valores indicados en el documento guía, ejecutar el escenario e interpretar los resultados respondiendo a diversas cuestiones.

En este primer Bloque todos los tráficos tienen la misma prioridad y no se implementan mecanismos de QoS. Las tramas llegan al nodo "PE_A" sin distinción por Clases de Servicio (CoS) por lo que éste no puede activar los mecanismos de calidad de servicio disponibles. En este escenario la congestión de un nodo afecta al retardo de cualquier tipo de tráfico.

El perfil de ancho de banda contratado es por EVC (Ingress Bandwith Profile per EVC) y su cumplimiento se comprueba con el módulo "Policia" (ver figura 3). En este caso, al no existir diferenciación por clases de servicio, se opta por marcar, en la función policia, las tramas conformes (tramas verdes) y la no conformes (tramas amarillas) con distintos valores de prioridad PCP simplemente para asegurar el caudal contratado en caso de congestión.

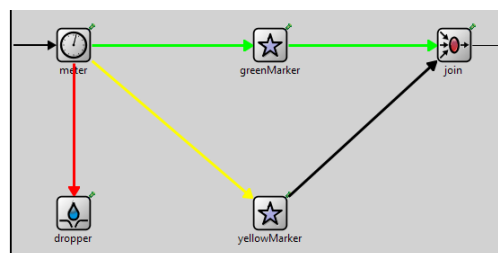


Fig 3 Módulo Policia

En la interfaz de salida del nodo "PE_A" se lleva a cabo la gestión de colas. Para ello se hace uso del módulo "colaRED" (ver figura 4). Este módulo sólo implementa una cola de salida ya que en este ejercicio todo el tráfico recibe el mismo servicio. Su finalidad es simplemente la de dar servicio a las tramas verdes y descartar las amarillas cuando se experimente congestión en el nodo y así cumplir con el Caudal contratado. Esta tarea la realiza la función de descarte RED priorizando el descarte de tramas amarillas frente al descarte de tramas verdes cuando exista congestión.

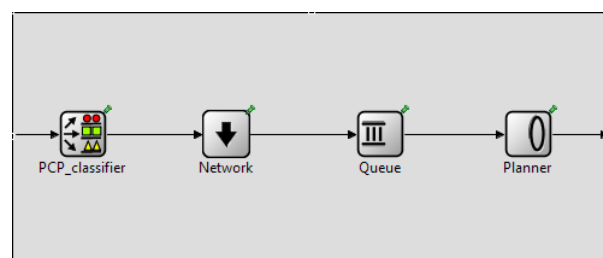


Fig 4 Módulo de Gestión de Colas

5.2. Simulación de la Red con Calidad de Servicio

En este segundo bloque que utiliza la misma metodología que en el Bloque anterior, se realizan 11 experimentos en los que el alumno podrá comprobar el efecto de la implementación de mecanismos de calidad de servicio (QoS) sobre el sistema de comunicaciones simulado. Para ello se diferencian los tipos de tráfico asignando tres tipos de prioridades, voz, vídeo y best effort. El escenario y el tráfico inicial es el mismo que en el ejercicio anterior, pero ahora el nodo "CE_A" va a marcar las tramas con los valores de prioridad PCP adecuados para diferenciar los tipos de tráfico.

Para marcar las tramas por clase de servicio se utiliza un clasificador que separa cada flujo de tráfico según su puerto destino, y tres marcadores (uno para cada CoS) que se encargan de escribir en el campo PCP de cada trama el valor adecuado para cada clase de servicio. En el escenario estos elementos se encuentran en un módulo llamado "QTagger" ubicado en el nodo "CE_A".

El perfil de ancho de banda contratado es por CoS (Ingress Bandwith Profile per CoS) se controla mediante el módulo "Policer_CoS". En este caso las tramas llegan a la función policía con el valor de prioridad PCP ya establecido, por lo que se ha decidido marcar las tramas no conformes con el valor de PCP correspondiente a "best effort" (baja prioridad) independientemente de la clase de servicio a la que pertenezcan, es decir, todo el tráfico que

no cumpla el perfil, sea de la clase de servicio que sea, se envía a la cola menos prioritaria. Las tramas que sí que cumple el perfil de cada clase de servicio se transmiten con el valor PCP con el que llegaron y se envían a su cola correspondiente.

5.3. Simulación de Red Basada en el Servicio E-line

Una vez finalizada la actividad anterior, se propone al alumno un escenario de mayor complejidad basado en el servicio E-Line (Ethernet Virtual Private Line) con tráfico generado por tres sedes. En este caso, el tráfico de cada sede se clasifica y transporta en una Conexión Virtual Ethernet (EVC) que luego se multiplexa sobre un interfaz UNI en la salida de la red.

Este escenario persigue el alumno se familiarice con la gestión de recursos e ingeniería de tráfico utilizados por los Operadores de Red para garantizar la calidad de servicio contratada por cada usuario. Las funciones policía y de gestión de las clases de servicio son esencialmente las mismas que se implementan en el interfaz UNI pero la naturaleza del tráfico a gestionar será el agregado estadístico del tráfico generado por cada una de las fuentes en cada EVC.

El alumno trabaja con escenarios similares a los bloques I y II, con y sin calidad de servicio, extrapolado a un mayor número de fuentes y conexiones EVC e identificando el impacto de la gestión agregada de tráfico sobre un mismo EVC dentro de la red. Cada fuente de tráfico, interfaz UNI, PE y la gestión de colas puede ser configurados individualmente.

6. Satisfacción de los Estudiantes con el Laboratorio Virtual

Con el fin de evaluar el grado de satisfacción del alumno se realizó una encuesta a los alumnos que han realizado la práctica durante el curso 2013/2014. En concreto se pasó la encuesta a los alumnos de Redes de Acceso que se imparte en 3º curso de Ingeniería de Telecomunicación en la Escuela de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia (Spain).

El formato de la encuesta contenía 10 preguntas que se evaluaban numéricamente entre 1 y 10. El formulario utilizado para la encuesta se muestra en la figura 5.

CUESTIONES	PUNTOS
Me ha ayudado a comprender mejor los mecanismos de QoS.	
La práctica es útil para mi aprendizaje.	
Los ejemplos propuestos en la práctica son adecuados a la materia.	
La organización de la práctica es clara y correcta.	
El tiempo dedicado a la práctica ha sido suficiente.	
El manejo del entorno de simulación ha resultado intuitivo.	
El entorno de simulación gráfico ha facilitado el aprendizaje.	
La tutorización local de la práctica por parte del profesor ha sido útil.	
Valoro positivamente la posibilidad de continuar el trabajo en casa.	
Mi valoración general de la práctica es positiva.	

Fig 5 Formulario de la encuesta de satisfacción de alumnado

Los resultados de la evaluación de los alumnos fueron muy satisfactorios. La media de los resultados obtenidos para cada una de las preguntas se puede observar en la figura 6.

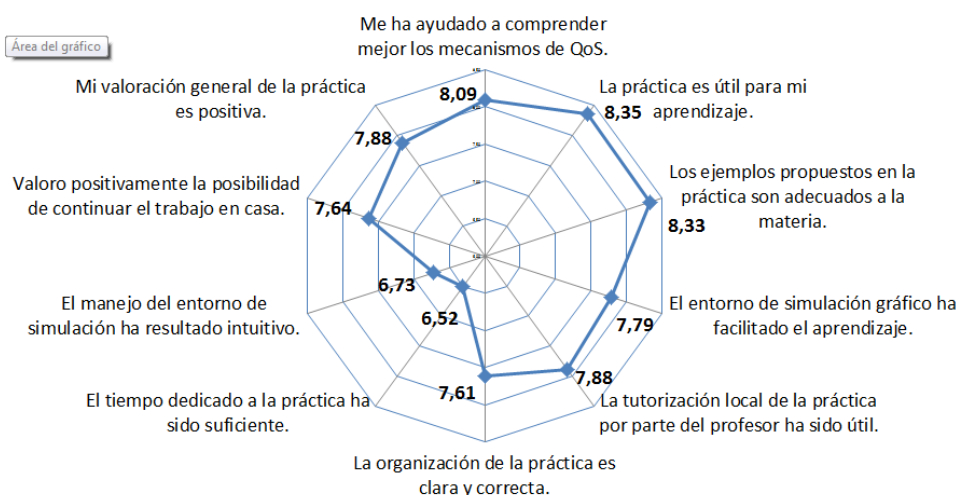


Fig 6 Resultados de la encuesta de satisfacción de alumnado

7. Conclusiones

La utilización de entornos gráficos de simulación como Omnett++ aporta ventajas significativas en la enseñanza de ingenierías, especialmente en áreas relacionadas con las telecomunicaciones, donde el número, dispersión de los elementos y coste del equipamiento es elevado.

En el presente artículo se ha descrito un laboratorio virtual sobre Redes de Siguiete Generación basadas en tecnologías de acceso Metro-Ethernet para su utilización en tareas docentes y de investigación. La capacidad de experimentación que aporta el entorno descrito en el artículo y la flexibilidad en las hipótesis de simulación, contribuyen al mejor entendimiento de los mecanismos subyacentes de esta tecnología.

La elección de un entorno abierto y portable para el diseño del Laboratorio Virtual, ha permitido construir una metodología de aprendizaje basada en tres ejes: el trabajo autónomo del alumno para comprender aspectos teóricos del problema y el manejo de la herramienta de simulación, la iteración presencial alumno-profesor como referencia y supervisión en la realización de los diferentes experimentos y por último, el trabajo en equipo para compartir experiencias y afianzar los conocimientos adquiridos.

Complementariamente se ha realizado una encuesta de satisfacción al colectivo de alumnos para obtener información relevante sobre tres aspectos de interés: grado de consecución de los objetivos de aprendizaje, iteración profesor-alumno, y aspectos relacionados con la organización: facilidad de uso, calidad de la documentación, bibliografía, etc.

En cuanto al logro de los objetivos de aprendizaje, la interacción profesor-alumno, y la posibilidad de continuar el trabajo autónomo, los resultados han sido claramente satisfactorios. Los factores con mayor recorrido de mejora están relacionados con el manejo del entorno de simulación, ciertamente complejo y con el tiempo destinado a la realización de los experimentos. Aunque los alumnos finalizaron en su práctica totalidad las actividades programadas en el tiempo establecido, el aprendizaje del entorno de simulación consumió un tiempo significativo. Se está estudiando una posible acción de mejora consistente en impartir una formación básica del entorno Omnet++ antes de la práctica.

8. Referencias

ABOUL-MAGD O., RABIE S. (2005) A Differentiated Service Two-Rate, Three-Color Marker with Efficient Handling of in-Profile Traffic, RFC 4115.

DOBRILOVIC D., BRTKA V., BERKOVIC I., y ODADZIC B. (2012), Evaluation of the virtual network laboratory exercises using a method based on the rough set theory, *Comput Appl Eng Educ* vol. 20, pp. 29-37, DOI: 10.1002/cae.20370.

IEEE Std. 802.1Q-2011, Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks ISBN 978-0-7381-6708-4.

INET Project, "<http://inet.omnetpp.org/>

ITU-T Recommendations Y. 2001- Next generation Networks General Overview.

ITU-T Recommendations Y.2111: Next Generation Networks, Quality of Service and performance. Resource and admission control functions in next generation networks

ITU-T Recommendations Y.2112: Next Generation Networks, Quality of Service and performance. A QoS control architecture for Ethernet-based IP access networks

MARQUES J. M., LAZARO D., JUAN A. A., VILAJOSANA X., DOMINGO M., JORBA J. (2006), PlanetLab@UOC: A Real Lab Over the Internet to Experiment With Distributed Systems, *Comput Appl Eng Educ* vol. 21, pp. 265–275, DOI:10.1002/cae.20468.

METRO ETHERNET FORUM, www.metroethernetforum.org

OMNET Project, <http://omnetpp.org/>