

# Diseño e Implementación de un Clasificador Multicampo de Paquetes para Conmutadores de Alta Velocidad con Soporte de QoS

Víctor Cañero Morera

Resumen—El presente documento constituye el *resumen de proyecto* presentado a la XXV Convocatoria de Premios “Ingenieros de Telecomunicación”, para concursar en el premio de Lucent Technologies al Mejor Proyecto de Fin de Carrera en Redes de Datos.

## Introducción

---

La clasificación de paquetes se ha convertido en uno de los cuellos de botella para el funcionamiento eficaz de las modernas redes multimedia. El crecimiento de la demanda de ancho de banda por parte de los usuarios, que no sólo hacen uso de servicios más exigentes sino que utilizan las facilidades de comunicación de forma más intensiva, no puede ser satisfecho de manera sostenible incrementando los recursos de transmisión. En este escenario se ha tornado imprescindible el dotar a las redes de telecomunicación con técnicas que permitan controlar la calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) de una manera técnica y económicamente viable.

Hoy en día las telecomunicaciones juegan un papel crucial en el funcionamiento de las sociedades modernas. Las empresas, las instituciones, los individuos, etc. utilizan de forma espontánea y natural los servicios disponibles, sin percatarse muchas veces de la complejidad de los procesos involucrados en la prestación de los mismos. Para trabajar, para interactuar, para divertirse, en general, para encontrar felicidad. Las telecomunicaciones ya no se usan sólo para comunicarse y, por lo tanto, su significado trasciende el campo de lo tecnológico—cómo se transmite la información, para abarcar además lo sociológico—qué es lo que perciben y sienten los usuarios.

La aparición de nuevos servicios y aplicaciones con estrictos requerimientos de ancho de banda y de entrega en tiempo real ha puesto de manifiesto la simplicidad de un protocolo IP, diseñado a principios de los 70, demostrando su incapacidad de ofrecer soluciones satisfactorias que permitan la integración efectiva de servicios multimedia garantizando simultáneamente la satisfacción de los usuarios y el aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles.

El funcionamiento exitoso de las tecnologías de QoS, que son la solución de ingeniería a esta realidad, queda sujeto entre otras circunstancias, al diseño de mecanismos y técnicas de clasificación de paquetes que den soporte a la diferenciación en tiempo real de

los servicios, necesaria para proporcionar el tratamiento individualizado en el que estas tecnologías se fundamentan.

El sistema diseñado en el presente Proyecto de Fin de Carrera constituye una solución factible y real al problema de la clasificación de paquetes en el escenario más restrictivo— el de un *router* de alta velocidad con soporte de Servicios Integrados. Dando soporte para la definición de 65536 flujos RSVP y siendo capaz de clasificar paquetes IP recibidos con una tasa de bit de 1,6Gbps, **el clasificador de paquetes diseñado presenta unas prestaciones nunca antes satisfechas por ningún clasificador comercial o experimental** del que se tenga constancia. En cualquier caso, el valor de los resultados del proyecto hay que juzgarlo considerando no sólo la dificultad del problema resuelto, sino el interés técnico existente en su resolución.

Siendo imposible condensar un trabajo tan amplio e intenso en tan sólo una decena de páginas, la estructura del presente documento está enfocada a transmitir dos aspectos concretos del proyecto de fin de carrera. Por un lado, las tareas desempeñadas para su ejecución, destacando la amplitud y multidisciplinariedad de las mismas. Por otro lado, se pretende proporcionar evidencia de los resultados y logros alcanzados, cuyo interés científico queda avalado por la publicación de dos artículos en prestigiosos congresos internacionales. En cualquier caso, este resumen debe entenderse de forma complementaria a la memoria del proyecto en la cual se realiza una descripción detallada. Antes de abarcar estas temáticas se va a realizar una breve introducción a las problemáticas de la clasificación de paquetes y de las arquitecturas de QoS.

## La Clasificación de Paquetes

La arquitectura de los modernos elementos de conmutación en las redes de telecomunicación, dista mucho de la arquitectura de los viejos conmutadores espaciales utilizados en las redes de telefonía analógica. Aunque los términos *router* y conmutador han tenido históricamente significados distintos, el aumento de las prestaciones de las redes ha hecho converger la arquitectura de ambos y en la actualidad cada vez es más difícil identificar diferencias reales, lo cual se refleja en el uso indistinto que en muchas ocasiones se hace de los mismos. Sea como fuere, la tendencia tecnológica ha hecho evolucionar su arquitectura hacia sistemas *hardware* complejos, compuestos por multitud de ASIC, entre los cuales se reparten las diferentes funcionalidades en que se puede abstraer el proceso global de conmutación como queda reflejado gráficamente en la ilustración 1.

Matrices de conmutación, gestores de colas virtuales, planificadores, enrutadores y clasificadores de paquetes son algunos de los elementos en que quedan divididos los *routers* y conmutadores. Aisladas sus funcionalidades, el avance de la ingeniería ha versado sobre la mejora continua e individualizada de las técnicas en que se fundamenta su funcionamiento. En concreto, el presente Proyecto de Fin de Carrera ha abordado la temática de la **clasificación de paquetes**, que es el proceso realizado en *routers* y conmutadores, de interpretar los *datos* contenidos en la cabecera de los paquetes recibidos, para extraer la *información* que ésta contiene a partir de la cual se decide el *servicio* que se les debe proporcionar.

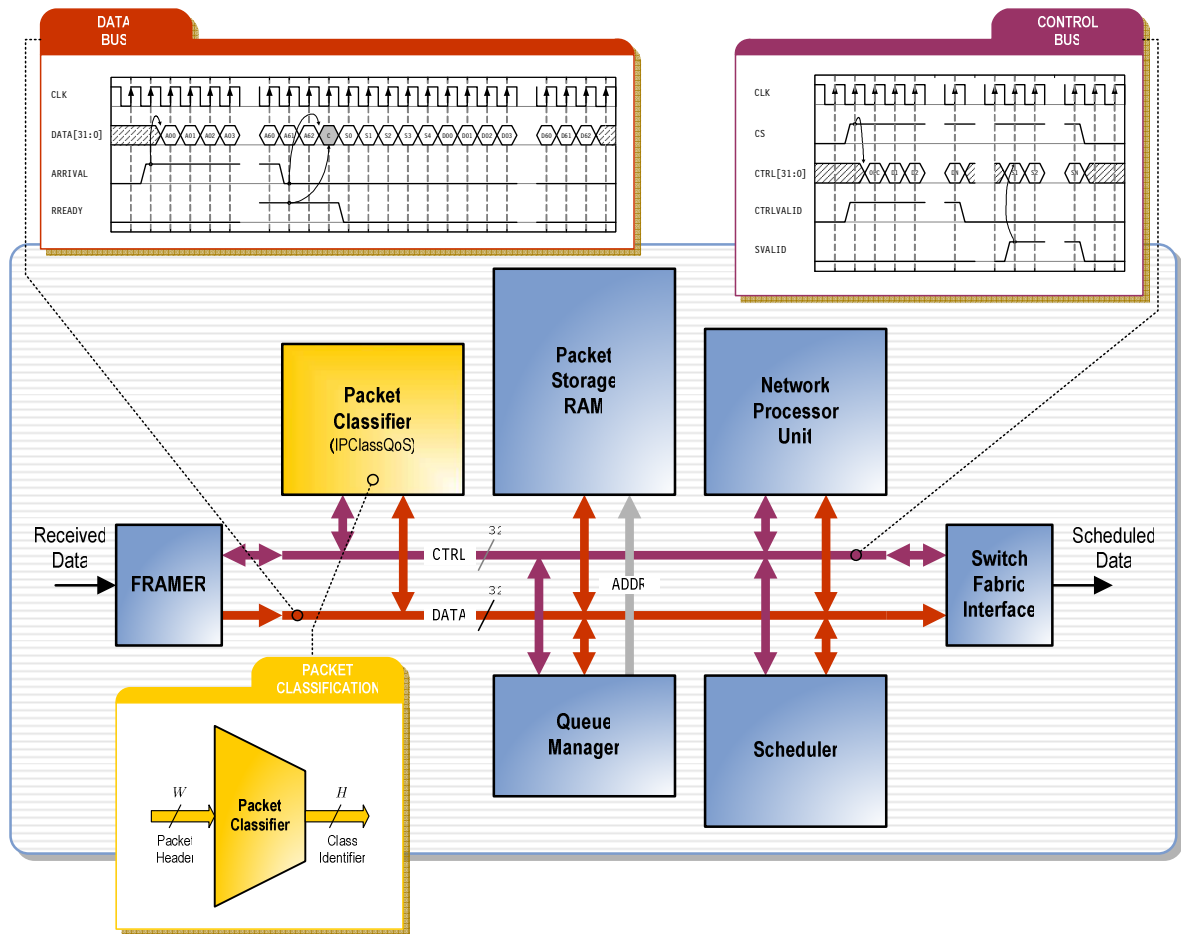


Ilustración 1 - Diagrama de la *Arquitectura del Router de Referencia* utilizado para el diseño

### Las Arquitecturas de QoS

La **calidad de servicio**, como grado de satisfacción de los usuarios, es una magnitud intangible, inmensurable y altamente subjetiva. Existen, sin embargo, parámetros medibles que se sabe influyen de forma determinante sobre el nivel de satisfacción percibido, como pueden ser la velocidad de transferencia, la tasa de error, la latencia o el *jitter* (fluctuación de la latencia). Las técnicas de ingeniería de tráfico permiten el control de los parámetros mostrados anteriormente. Entre ellas podemos destacar técnicas como el control de acceso, la priorización y conformación de tráfico, el dimensionado óptimo de los elementos de almacenamiento y los anchos de banda o la reserva de recursos.

Con todo, la implementación de cada una de estas técnicas por separado no conseguiría controlar globalmente el valor de todos los parámetros de QoS y en consecuencia, tampoco sería capaz de asegurar un óptimo grado de satisfacción de los usuarios. El control extremo a extremo de la calidad de servicio requiere aunar de forma coordinada múltiples de estas técnicas bajo lo que se denomina una **arquitectura de QoS**.

Por muy diferentes que puedan ser las distintas técnicas de QoS, todas ellas se fundamentan en última instancia en proporcionar un tratamiento diferenciado durante el proceso de conmutación. Tanto si se diferencian los servicios, los usuarios o los flujos, la

clasificación de paquetes constituye uno de los procesos clave en la consecución de esta diferenciación.

## Tareas Realizadas

La variedad y lo multidisciplinario de las temáticas tratadas son las características que con mayor rigor describen el trabajo realizado. Como queda reflejado en la ilustración 2, se ha cubierto todo el ciclo de diseño, desde la fase de análisis, donde la temática estaba relacionada con las matemáticas, los protocolos de red, y las técnicas de ingeniería de tráfico, hasta las fases de implementación y verificación, donde la problemática se centraba más en el diseño algorítmico y microelectrónico.

A continuación se hará un breve repaso de las tareas realizadas dentro del Proyecto de Fin de Carrera, más con el objetivo de mostrar evidencia del trabajo realizado que con el de describir los resultados obtenidos en cada una de las fases, información que queda extensamente descrita en la memoria y de la cual se proporciona un somero resumen en el apartado de “Resultados del Proyecto. Contribuciones a la Técnica”.

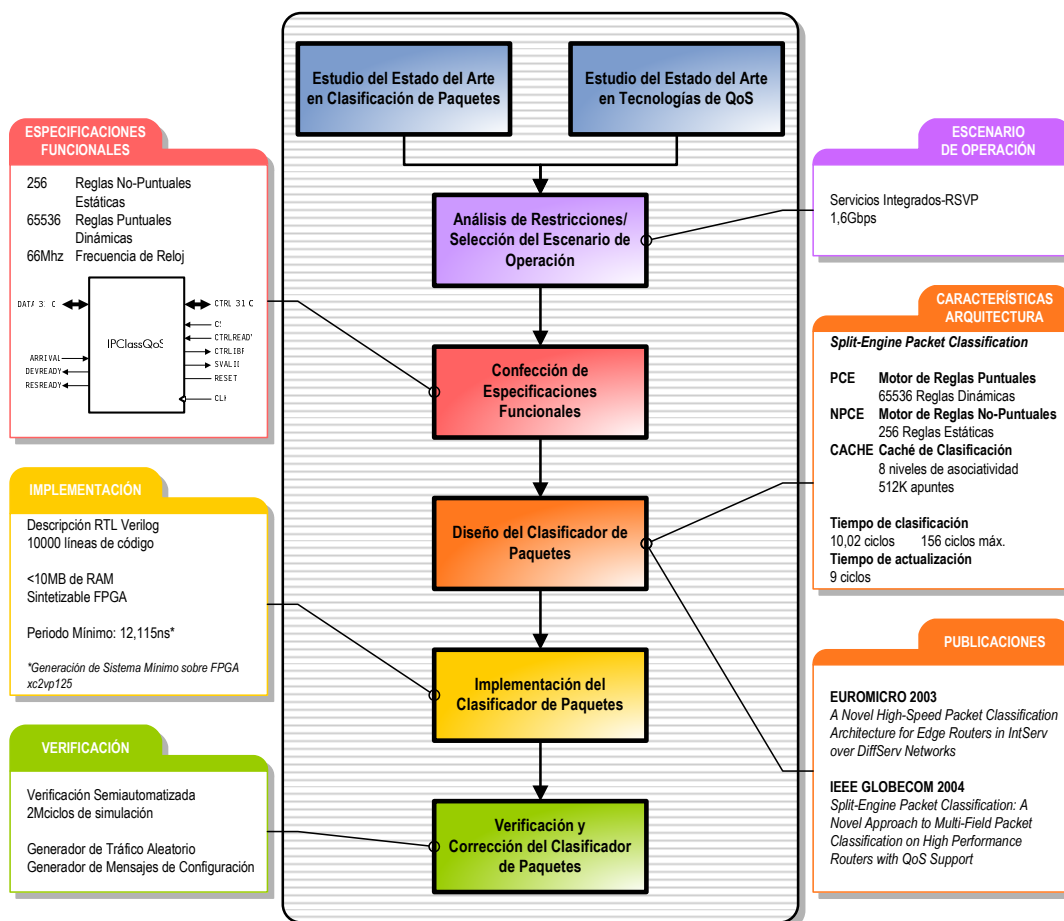


Ilustración 2 - Diagrama ilustrativo de las tareas realizadas y los resultados obtenidos

## Antecedentes

La investigación y desarrollo de sistemas microelectrónicos para *routers* y conmutadores de altas prestaciones ha sido y es una de las principales líneas de investigación de la División de Diseño de Sistemas Integrados (DSI) del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (IUMA-ULPGC). Aunque la temática de la clasificación de paquetes nunca antes había sido tratada por el departamento, sí se había percibido la importancia crítica de esta función en la capacidad de los elementos de conmutación para afrontar las nuevas problemáticas derivadas del uso de técnicas de ingeniería de tráfico (*traffic engineering*) en que se fundamentan las arquitecturas de QoS.

## Estudio del estado del arte en Clasificación de Paquetes

Teniendo en cuenta que la clasificación de paquetes nunca antes había sido tratada en profundidad por la división, se comenzó el desarrollo del proyecto realizando una exhaustiva revisión del estado del arte en técnicas y métodos de clasificación de paquetes. Abarcando además temas afines como la clasificación de flujos, la caracterización de tráficos, dimensionado de redes, etc. se hizo un estudio en el que se procesaron más de *medio centenar de artículos, white papers, tutoriales*, etc. No sólo se consultaron las fuentes de información más actualizadas (la librería digital *IEEE Xplore* o buscadores como *citeseer*), sino que se recurrió, además, a archivos de bibliotecas de otras universidades en los que se consultaron artículos que databan de tan atrás como 1979.

En la memoria del proyecto se dedica un capítulo completo a la descripción del problema de la clasificación de paquetes, sin pretender realizar un repaso pormenorizado, así como del conjunto más relevante de los métodos de clasificación analizados. En esta descripción se procura abordar de una manera práctica el funcionamiento de los diferentes métodos de clasificación, haciendo especial énfasis en sus prestaciones, aspectos de diseño e implementación *hardware*, escalabilidad, etc.

Fruto de este análisis se consiguió un profundo grado de conocimiento de la temática, que permitió a la postre contribuir significativamente al estado del arte, dentro de las posibilidades de un Proyecto de Fin de Carrera, como demuestra la publicación de un artículo en el prestigioso congreso IEEE GLOBECOM del año 2004, el cual fue precedido por uno anterior en el congreso EUROMICRO 2003.

## Estudio del estado del arte en Tecnologías de QoS

Partiendo de la realidad globalmente aceptada, de que la implantación de arquitecturas de QoS es una necesidad esencial para la viabilidad futura del modelo de redes integradas de transmisión de datos multimedia hacia el que se está evolucionando, y de la importancia crítica del proceso de clasificación de paquetes en el funcionamiento de estas arquitecturas, el presente Proyecto de Fin de Carrera ha pretendido hacer su contribución al desarrollo de la técnica, desarrollando un clasificador de paquetes que permita una implementación viable de las tecnologías de QoS.

Con este objetivo, se ha realizado un amplio estudio del estado del arte en las arquitecturas y técnicas de QoS. *Servicios Integrados, RSVP, Servicios Diferenciados, SBM, 802.Ip, MPLS*, etc. son algunas de las arquitecturas analizadas, muchas de las cuales son

descritas en un capítulo exclusivo dedicado a las Tecnologías de QoS dentro de la memoria del proyecto. Las tecnologías de QoS más ampliamente aceptadas son Servicios Integrados—IntServ y Servicios Diferenciados—DiffServ, las cuales constituyen enfoques opuestos para implementar redes con soporte de QoS. Realizando un costoso tratamiento *per-flow* con reserva de recursos, IntServ, alcanza el grado máximo de eficacia, consiguiendo máxima satisfacción (QoS garantizada) y máximo aprovechamiento de los recursos de transmisión. Por el contrario, DiffServ, proporciona un menor nivel de satisfacción a los usuarios (QoS relativa) y un menor aprovechamiento de los recursos, pero constituye una solución más simple y fácilmente realizable.

Con todo, ambas arquitecturas pueden ser consideradas complementarias, estableciendo un modelo de red que utiliza Servicios Integrados para la periferia y Servicios Diferenciados para el núcleo de la red, y con el que se puede conseguir simultáneamente escalabilidad, satisfacción garantizada y máximo aprovechamiento. Este paradigma de red, *IntServ sobre redes DiffServ* es propuesto por el IETF en la RFC-2998 y constituye una de las apuestas de futuro de fabricantes como Cisco.

#### Análisis de restricciones y selección del Escenario de Funcionamiento

Como resultado de la revisión realizada sobre los diferentes métodos de clasificación de paquetes, se detectó que los estudios y trabajos existentes abordaban el problema, más desde un punto de vista matemático y algorítmico, que desde un punto de vista de ingeniería. De esta manera, el esfuerzo estaba fundamentalmente centrado en encontrar complejas técnicas de clasificación que permitiesen alcanzar prestaciones singulares utilizando un método individualizado. En el presente Proyecto de Fin de Carrera se decidió abordar un problema más propio del mundo de la *ingeniería*, denominado **Clasificación de Paquetes Orientada a QoS**, consistente en encontrar *soluciones prácticas y eficaces* al proceso de clasificación de paquetes en un *router* con soporte de QoS que opere en un *escenario concreto*.

Como consecuencia de la apreciación anterior, se acometió el estudio del estado del arte en arquitecturas de QoS, para poder posteriormente realizar un análisis de las restricciones impuestas por las diferentes arquitecturas sobre el proceso de clasificación de paquetes. Estas restricciones y particularidades analizadas proporcionan información sobre las prestaciones que deben de tener los métodos, especialmente respecto al número de reglas que deben de soportar, la sintaxis en la definición, la velocidad de actualización y, por supuesto, el tiempo de clasificación.

Una vez se analizaron estas restricciones, y tras haber realizado un análisis de las tendencias de mercado, se optó por afrontar el diseño de un clasificador multicampo de paquetes que proporcionase soporte a la arquitectura de Servicios Integrados, dentro del paradigma de red **IntServ sobre redes DiffServ en el emplazamiento más restrictivo**, que es el de un *router* de borde. La elección de este escenario y el por qué se puede considerar como el más restrictivo, son aspectos ampliamente documentados en el capítulo 4 de la memoria del proyecto.

## Confección de las Especificaciones Funcionales

Partiendo de los conocimientos sobre arquitectura de conmutadores y *routers*, así como de los requerimientos impuestos por el escenario de funcionamiento seleccionado, se concretaron unas especificaciones funcionales, con el objetivo de maximizar la utilidad de los resultados que se obtuviesen tras la fase de diseño.

Esta tarea de diseño de las especificaciones funcionales abarcó por las peculiaridades del problema tratado aspectos que en condiciones normales son requerimientos de partida. Así, para diseñar la interfaz del clasificador de paquetes se ideó una hipotética arquitectura de tarjeta de línea, que es la mostrada en la ilustración 1 y el protocolo de comunicación a través de sus buses. Además, fue necesario idear una mecánica que permitiese concretar los requerimientos impuestos por el escenario de funcionamiento en características mesurables y útiles, como velocidad de clasificación, número de reglas soportadas, velocidad de actualización, etc. Las especificaciones funcionales (buses, señales, cronogramas, formato de los datos), las prestaciones exigidas (velocidad de operación, operaciones soportadas, tamaño soportado de las tablas de clasificación) y todas las decisiones y razonamientos realizados para su confección son ampliamente descritos en la memoria del proyecto en el capítulo 4. En la ilustración 2 se recogen las prestaciones más importantes.

## Diseño del Clasificador de Paquetes

A partir de las especificaciones funcionales impuestas, se afrontó el diseño del clasificador de paquetes. Es el proceso de diseño la tarea más creativa del proyecto y en la que se hicieron las contribuciones más importantes. La solución aportada en el presente Proyecto de Fin de Carrera constituye una *técnica novedosa* para la clasificación de paquetes, la cual se detalla en el apartado “Resultados del Proyecto. Contribución a la Técnica”.

Esta técnica novedosa de clasificación fue sometida a un exhaustivo análisis teórico para alcanzar un grado razonable de confianza en la misma, y posteriormente fue materializada en un diseño *hardware* a nivel de módulos, que quedó plasmado en un documento de especificaciones arquitecturales, a partir del cual se realizó la implementación.

## Implementación del Clasificador de Paquetes

La arquitectura del clasificador de paquetes diseñado fue implementada, realizando una descripción *hardware* a nivel RTL (*Register Transfer Level*) de la misma, con el lenguaje HDL (*Hardware Description Language*) Verilog. Es importante señalar que para realizar la descripción se siguió con escurpulosidad un conjunto de reglas que permitirían que el sistema descrito fuese completamente sintetizable. El conjunto de reglas seguido forma parte, en términos generales, de las pautas estándar de diseño electrónico, pero también es resultado de la experiencia en esta área del departamento DSI del IUMA.

Si bien la principal finalidad técnica de su realización era la de comprobar la validez funcional de la solución propuesta, aportando así mayor grado de validez a las tesis propuestas, y no la de obtener un producto apto para ser comercializado, desde un punto de vista académico es evidente que la complejidad del sistema desarrollado exigió amplias habilidades y conocimientos en materia de diseño electrónico.

Un sistema mínimo del clasificador de paquetes fue sometido satisfactoriamente a unos procesos de síntesis y generación, mapeando dicho sistema sobre una FPGA del fabricante XILINX. El hecho de realizar la síntesis y generación de un sistema mínimo es consecuencia de los altos requerimientos de memoria (9,5Mb aproximadamente) por parte del sistema. Esto, en cualquier caso, no resta validez al diseño sino que corrobora una circunstancia conocida de antemano y que en un diseño real podría ser resuelta recurriendo a módulos externos de memoria.

### Verificación y Corrección del Clasificador de Paquetes

Se estima que la fase de verificación consume alrededor del 70% del esfuerzo de desarrollo en un proyecto de ingeniería, y que el código destinado a este fin constituye aproximadamente el 80% del total. Este grado de rigor escapa a los objetivos del presente Proyecto de Fin de Carrera, ya que como se comentó anteriormente, la principal finalidad de la implementación, verificación y corrección del sistema era la de demostrar la validez funcional de la solución propuesta y no la de obtener un producto comercial. Aun así, el proceso de verificación y corrección al que se sometió el sistema desarrollado puede calificarse como muy exhaustivo, y esto es importante resaltarlo especialmente si tenemos en cuenta cuales eran los objetivos iniciales.

La verificación se realizó siguiendo un enfoque *bottom-to-top* en el cual se verificaron por separado los distintos módulos que componían el sistema, a continuación se hizo una verificación a nivel de clusters y finalmente una verificación global del sistema. La verificación del sistema se hizo mediante simulación, y para ello se recurrió a la técnica de los bancos de prueba (*testbench*). En la realización de estas simulaciones fue necesario confeccionar un conjunto de aplicaciones en C++ que permitían automatizar total o parcialmente la obtención de los vectores de test. Entre estas aplicaciones podemos destacar una aplicación para la confección de tablas de clasificación (*TableManager*), un generador de matrices de *hash* (*HashGenerator*) y un generador de tráfico aleatorio (*TrafficGenerator*).

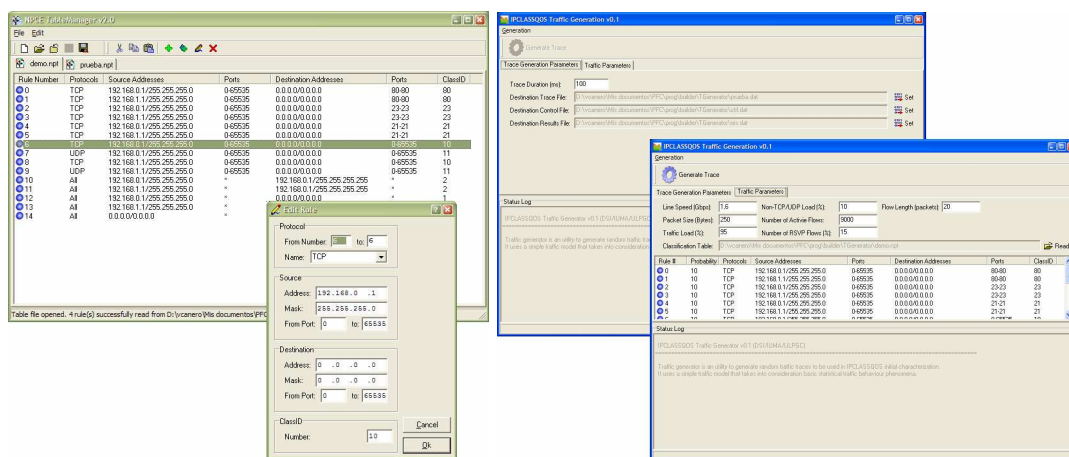


Ilustración 3 – Interfaces de las aplicaciones TableManager y TrafficGenerator

El sistema completo fue sometido satisfactoriamente a múltiples simulaciones semi-automatizadas de más de dos millones de ciclos de duración. Teniendo en cuenta lo



objetivos del proceso, estas simulaciones aportaron una evidencia más que suficiente sobre la validez de la solución aportada y sobre la corrección del sistema diseñado.

## Resultados del Proyecto. Contribuciones a la Técnica

---

**E**n este Proyecto de Fin de Carrera se ha realizado el estudio, diseño, descripción *hardware*, verificación funcional y síntesis de un sistema de clasificación de paquetes para su utilización en *routers* de altas prestaciones con soporte de QoS.

El sistema desarrollado es capaz de clasificar paquetes IP recibidos por un enlace con una tasa de bit de 1,6Gbps, a partir de una tabla de clasificación formada, por un lado, de un máximo de 256 reglas estáticas no-puntuales, configurables durante el proceso de inicialización, y definidas mediante rangos y máscaras sobre los campos Identificador de Protocolo, Dirección Origen, Dirección Destino y opcionalmente (sólo para los paquetes pertenecientes a los protocolos TCP y UDP) del Puerto Origen y Puerto Destino. Por otro lado, podrá contener un máximo de 65536 reglas puntuales, definidas sobre el mismo conjunto de campos, y que pueden ser definidas y eliminadas de forma dinámica.

Las prestaciones obtenidas por el sistema diseñado serían imposibles de conseguir si esta función fuese realizada en un procesador de red genérico, o incluso por un microprocesador RISC de propósito general. De hecho, en la actualidad no existe ningún sistema, *software* o *hardware*, comercialmente disponible, capaz de realizar esta función con las prestaciones que proporciona el dispositivo implementado en este Proyecto de Fin de Carrera. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el dimensionado de la arquitectura propuesta no está optimizado, requiriendo un estudio profundo de las características reales de tráfico transferido a través de las redes actuales de comunicaciones que queda fuera de los objetivos del proyecto.

Con todo, la principal contribución a la técnica del presente Proyecto de Fin de Carrera no es el haber diseñado un clasificador de paquetes con prestaciones tan singulares, sino la novedosa solución propuesta para el problema de la clasificación de paquetes, denominada *Split-Engine Packet Classification*, SPC. En los próximos apartados se realizará una breve descripción de esta solución así como de la arquitectura del sistema diseñado.

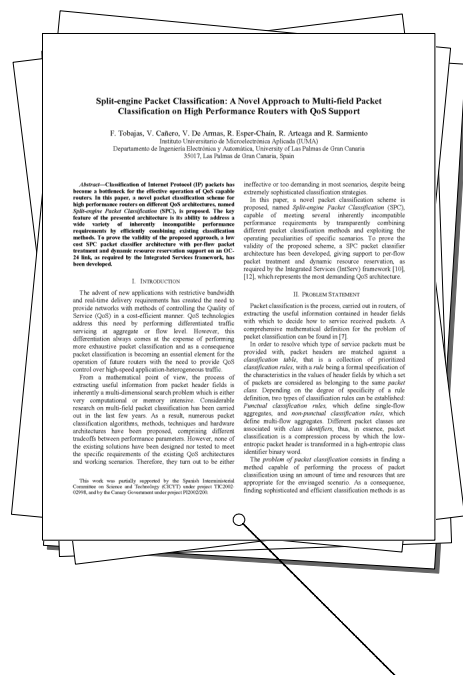
### *Split-Engine Packet Classification* (SPC)

Desde un punto de vista matemático, el proceso de extraer información útil de las cabeceras de los paquetes es inherentemente un problema de búsqueda multi-dimensional, para cuya resolución se necesitan bien una gran cantidad de recursos de almacenamiento o una gran cantidad de potencia de cálculo. En los últimos años se ha dedicado una intensa labor investigadora a este problema, como resultado de la cual se han propuesto múltiples algoritmos, métodos, técnicas y arquitecturas de clasificación de paquetes, los cuales alcanzan diferentes compromisos entre las diferentes prestaciones. Sin embargo, ninguna de las soluciones existentes, a pesar de ser altamente sofisticadas, ha sido diseñada o probada para satisfacer los requerimientos concretos de las arquitecturas de QoS existentes, por lo

cual resultan ser o bien demasiado ineficaces o bien demasiado exigentes en recursos para la mayor parte de escenarios.

Como consecuencia de la observación inicial de que las tablas de clasificación en Servicios Integrados están formadas por dos subgrupos distintos de reglas (reglas puntuales y reglas no-puntuales), y a la luz de la imposibilidad aparente de crear un único método de clasificación de paquetes capaz de satisfacer simultáneamente todos los requerimientos impuestos por este escenario, se ha ideado un novedoso esquema de clasificación de paquetes, consistente en dividir de forma transparente dicho proceso en dos motores, cada uno de los cuales está diseñado para gestionar diferentes necesidades. El razonamiento que subyace a este esquema es que ambos motores pueden implementar distintas técnicas de clasificación para gestionar de forma eficiente cada uno de los dos subconjuntos de reglas detectados. Así, los paquetes recibidos, pueden ser clasificados eficientemente en paralelo por ambos motores proporcionándose un único resultado, aquel asociado con la regla satisfecha de mayor prioridad.

V. Cañero, F. Tobajas, V. de Armas, R. Esper-Chaín and R. Sarmiento, "A Novel High-Speed Packet Classification Architecture for Edge Routers in IntServ over DiffServ Networks", in *Proc. EUROMICRO*, September 2003.



F. Tobajas, V. Cañero, V. de Armas, R. Esper-Chaín, R. Arteaga, and R. Sarmiento, "Split-engine Packet Classification: A Novel Approach to Multi-Field Packet Classification on High Performance Routers with QoS Support", in *Proc. IEEE GLOBECOM*, November 2004.

Ilustración 4 – Artículos actualmente publicados sobre el presente Proyecto de Fin de Carrera

La diferenciación de los dos tipos de reglas es consecuencia de la necesidad de realizar tratamiento *per-flow* bajo demanda. De este modo, el clasificador de paquetes debe permitir la definición y eliminación dinámica de reglas puntuales, utilizadas para distinguir aquellos flujos con reserva de recursos activa. Además de este primer tipo de reglas, el clasificador debe gestionar un conjunto básico de reglas definidas de forma tradicional (mediante rangos y máscaras) para proporcionar servicio a aquellos flujos sin reserva de

recursos. Después de analizar el estándar RSVP y las tendencias de mercado, se concluyó que el conjunto básico de reglas no-puntuales es pequeño y escasamente dinámico. Como consecuencia, el clasificador de paquetes dispondrá de un motor para clasificar flujos definidos por reglas puntuales, y un segundo motor para gestionar la tabla básica de clasificación, cada uno implementado utilizando un método de clasificación simple y eficiente.

Esta apreciación inicial puede ser extendida a cualquier escenario de trabajo, de tal manera que un clasificador de paquetes de alta complejidad puede ser implementado como combinación de múltiples motores de clasificación, operando en paralelo y utilizando métodos de clasificación diferentes. Esta novedosa manera de afrontar la clasificación de paquetes, denominada constituye la principal aportación del Proyecto de Fin de Carrera. En general, la capacidad de satisfacer requerimientos contraproducentes no es la única virtud del esquema SPC. De hecho, SPC puede ser utilizado para acelerar sistemas de clasificación de paquetes o para hacer un uso escalable de métodos de clasificación no-escalables. Para el correcto funcionamiento de la solución propuesta hay que considerar dos aspectos clave, que son la gestión del cumplimiento de las prioridades (*priority enforcement*) y el control del sesgo en el tiempo de clasificación (*classification skew*).

El valor de esta contribución, la invención del esquema de clasificación SPC, queda contrastado por la publicación en el prestigioso congreso IEEE GLOBECOM del año 2004 del artículo “*Split-engine Packet Classification: A Novel Approach to Multi-Field Packet Classification on High Performance Routers with QoS Support*” en el cual se proporciona una descripción más profunda del esquema ideado.

#### Arquitectura del Clasificador de Paquetes Diseñado

El sistema diseñado, IPClassQoS, hace uso simultáneo de tres elementos clave de diseño. En primer lugar, se utiliza el mecanismo SPC descrito anteriormente. En segundo lugar, para gestionar el sesgo del tiempo de clasificación (*classification skew*) se hace uso de una caché de clasificación, inspirada en la propuesta por Xu, Singhal y Degroat<sup>1</sup> a la que se hicieron unas novedosas modificaciones. Finalmente, se emplea un mecanismo de reordenamiento distribuido, específicamente ideado para la presente arquitectura.

La arquitectura del clasificador de paquetes, mostrada en la ilustración 5, está formada por cinco módulos independientes comunicados por un bus interno. Estos módulos son, la caché de clasificación, los dos motores de clasificación traseros (uno para reglas puntuales y otro para reglas no-puntuales), la interfaz del bus de datos y la unidad de control.

En el modo normal de funcionamiento, la interfaz del bus de datos captura de forma automática los campos de las cabeceras de los paquetes. Esta circunstancia es convenientemente señalizada a los módulos internos, a los que se retransmiten estos campos

---

<sup>1</sup> J. Xu, M. Singhal and J. Degroat, “A novel cache architecture to support layer-four packet classification at memory access speeds” en el *IEEE INFOCOM*, marzo de 2000. La caché de clasificación propuesta en este artículo presenta dos características altamente novedosas que son la asociatividad-dinámica y el algoritmo de reemplazo *near-LRU*. El sistema propuesto, sin embargo, debe detener su funcionamiento cuando se producen fallos de caché. Con las mejoras realizadas, la caché puede operar de forma no bloqueante, mejorando aun más sus prestaciones.

tan pronto se puede hacer uso del bus interno. Las cabeceras de los paquetes quedan entonces almacenadas en las colas de entrada de la caché de clasificación y de los motores traseros, los cuales las van sirviendo en orden FIFO. Respetando el mecanismo de reordenamiento distribuido, lo dos motores traseros y la caché de clasificación, se coordinan para proporcionar los resultados de forma única y ordenada.

La unidad de control, por su parte, es la encargada de actuar de árbitro del bus interno así como de interpretar las instrucciones de control recibidas por el bus destinado a este fin. Estas instrucciones incluyen, el mensaje de reset, las instrucciones de definición/eliminación de reglas puntuales y las de consulta de las palabras de estado, las cuales son también gestionadas por la unidad de control.

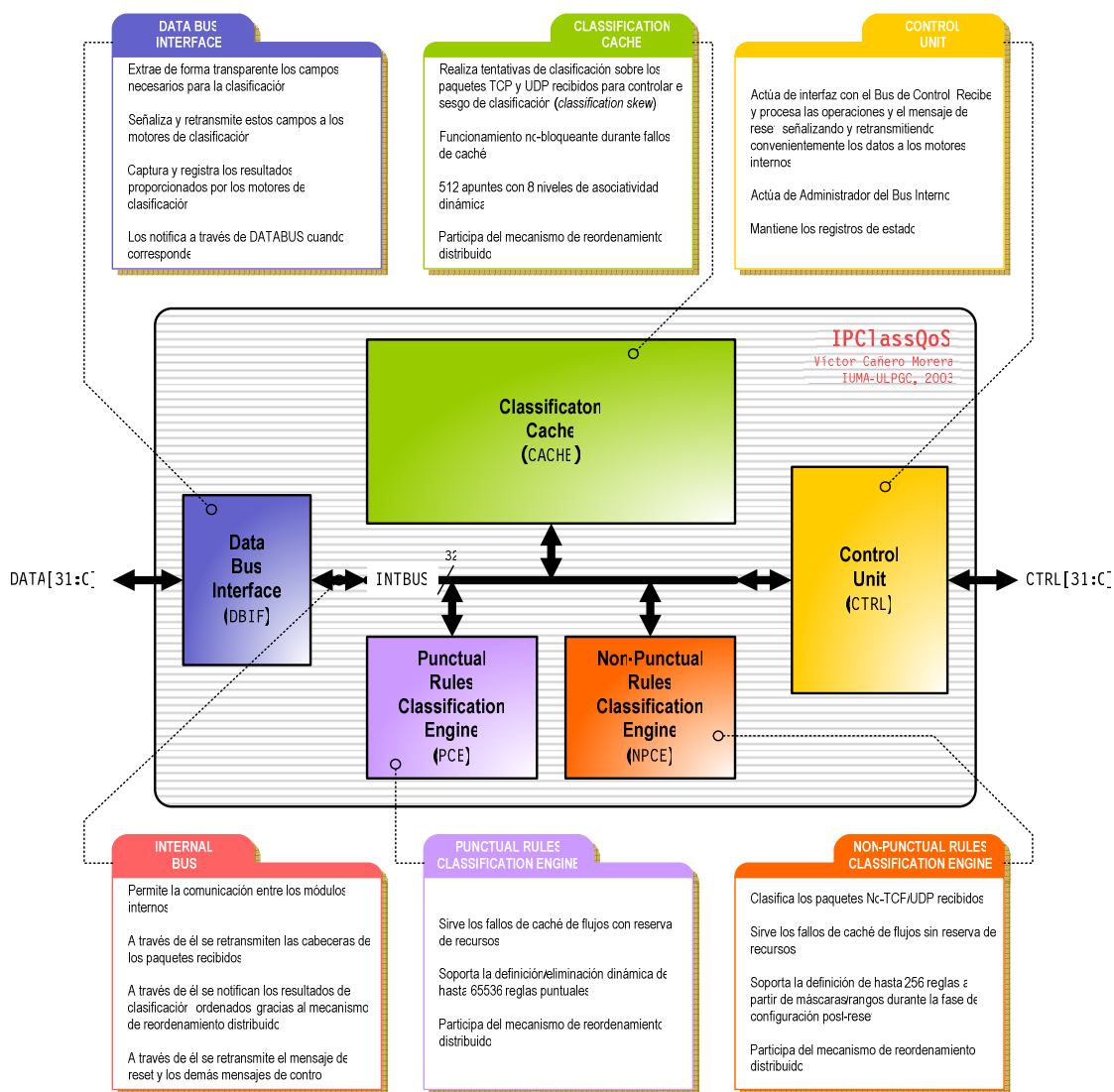


Ilustración 5 – Arquitectura del Clasificador de Paquetes IPClassQoS

---

## Contribución del Proyecto de Fin de Carrera a las Redes de Datos

---

La aparición de nuevos servicios y aplicaciones con estrictos requerimientos de ancho de banda y de entrega en tiempo real ha puesto de manifiesto la simplicidad de los protocolos de las redes de transmisión de datos tradicionales, diseñados en su mayoría antes de la década de los 80, demostrando su incapacidad de ofrecer soluciones satisfactorias que permitan la integración efectiva de servicios multimedia garantizando simultáneamente la satisfacción de los usuarios y el aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles.

En cualquier caso, la convergencia multimedia real que están sufriendo las telecomunicaciones dista considerablemente de la convergencia esperada cuando se diseñaron las redes de servicios integrados (RDSI). En la actualidad, la tendencia dominante es a disponer de una única red de telecomunicaciones, basada en conmutación de paquetes, por la cual son multiplexados los diferentes servicios con independencia del tipo de información que transporten. En un mundo en el que las telecomunicaciones ya no se usan sólo para comunicarse sino para encontrar la felicidad, el significado de éstas trasciende el campo de lo tecnológico—cómo se transmite la información, para abarcar además lo sociológico—qué es lo que perciben y sienten los usuarios. De este modo, lo importante ya no es transmitir información sino satisfacer a los usuarios.

La satisfacción de los usuarios, en cualquier caso, no es un concepto novedoso. El dimensionado de las redes de telefonía ha considerado tradicionalmente el Grado de Servicio como un parámetro crítico de diseño. Las técnicas tradicionales de dimensionado, sin embargo, ya no son aplicables. El crecimiento de la demanda de ancho de banda por parte de los usuarios, que no sólo hacen uso de servicios más exigentes sino que utilizan las facilidades de comunicación de forma más intensiva, no puede ser satisfecho de manera sostenible incrementando los recursos de transmisión. En este escenario se ha tornado imprescindible el dotar a las redes de telecomunicación con técnicas que permitan controlar la calidad de servicio (QoS) de una manera técnica y económicamente viable.

La calidad de servicio, como grado de satisfacción de los usuarios, es una magnitud intangible, inmensurable y altamente subjetiva. El control extremo a extremo de la calidad de servicio requiere aunar de forma coordinada múltiples de técnicas y protocolos bajo lo que se denominan una arquitecturas de QoS. Por muy diferentes que puedan ser las distintas técnicas de QoS, todas ellas se fundamentan en última instancia en proporcionar un tratamiento diferenciado durante el proceso de conmutación. *Tanto si se diferencian los servicios, los usuarios o los flujos, la clasificación de paquetes constituye uno de los procesos clave en la consecución de esta diferenciación.*

Realizando un costoso tratamiento *per-flow* con reserva de recursos, Servicios Integrados es la arquitectura de QoS que alcanza el grado máximo de eficacia, consiguiendo máxima satisfacción (QoS garantizada) y máximo aprovechamiento de los recursos de transmisión. El presente Proyecto de Fin de Carrera ha propuesto una novedosa solución al problema de la clasificación de paquetes que permite satisfacer de una manera viable y práctica los requerimientos impuestos por esta arquitectura.

En la medida en que la implementación de arquitecturas de QoS es esencial para conseguir proporcionar de forma óptima los diferentes servicios, garantizando así la satisfacción de los usuarios, y en la medida en que Servicios Integrados es la arquitectura que de una manera más fiable garantiza esta satisfacción, hay que destacar la importancia de haber diseñado una arquitectura de clasificación (SPC) que permite cumplir requisitos nunca antes cubiertos por sistemas de clasificación comerciales o experimentales.