

# HERRAMIENTA oPASS PARA LA EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DE ARQUITECTURAS DE CONMUTACIÓN ÓPTICA DE PAQUETES

M. V. Bueno Delgado, P. Pavón Mariño, J. García Haro.

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

Universidad Politécnica de Cartagena, CP 30202, Spain, Tel. +34 968 325952 Fax +34 968 325973

e-mail: {mvictoria.bueno, pablo.pavon, joang.haro}@upct.es

*Abstract- In this paper we describe oPASS (Optical Packet Switch Simulator), a simulation tool specifically designed for the evaluation of slotted Optical Packet Switching (OPS) switching architectures. oPASS is implemented in OMNET++, a general purpose event-driven simulation framework. oPASS allows the evaluation of classical parameters in packet networks like packet loss probability and distribution of packet delay. Specific issues associated to OPS networks are also incorporated: a set of particular OPS networks traffic generators, simulation modules for the evaluation of most relevant OPS switching architectures and the collection of specific statistics associated to packet order issues in OPS networks. Some simulation results are presented to illustrate the tool. oPASS is flexible and extensible. Since 2002, it has been employed in the investigation carried out by the Telematics Engineering Group of the Polytechnic University of Cartagena, in the field of the performance evaluation of OPS switching architectures.*

## I. INTRODUCCIÓN

En el dominio óptico, la Conmutación Óptica de Paquetes (*Optical Packet Switching*, OPS), es similar a la conmutación de paquetes tradicional bajo tecnología electrónica, salvo que la carga de datos (*payload*) de los paquetes que atraviesan un nodo es conmutada y almacenada en estado óptico mientras la cabecera, que contiene la información de control, se procesa de forma electrónica.

El tamaño del paquete óptico es un parámetro a optimizar en las redes OPS. En este artículo, nos centramos en la alternativa denominada OPS síncrono-ranurado. En un nodo de conmutación OPS de este tipo, los paquetes ópticos son de tamaño fijo, y sufren un proceso de alineación óptica a la entrada del nodo de conmutación. La arquitectura de conmutación (*switch fabric*) es el componente del nodo que realiza la transferencia de paquetes ópticos desde sus puertos de entrada hacia los correspondientes puertos de salida. El conmutador almacena en estado óptico los paquetes, para resolver la contención. La necesidad de realizar la función de conmutación óptica y almacenamiento paquete por paquete, impone los requisitos tecnológicos más estrictos. Es por ello que, a pesar de existir prototipos de nodos OPS desde la década de los 90, no se prevé la existencia de una

red OPS comercial hasta el medio plazo. A este respecto, el proyecto europeo DAVID [1] ha pronosticado la opción OPS síncrono-ranurado, con tamaño de paquete óptico en torno a 1  $\mu$ s, como la elección previsible para las futuras redes troncales OPS. La arquitectura de conmutación es el componente de mayor coste en el diseño de los nodos OPS. Los dispositivos de conmutación óptica utilizados en el diseño de los nodos *Wavelength Routing* -p.e. dispositivos basados en micro-espejos MEMS (*Micro-Electro-Mechanical-Systems*)- proporcionan tiempos de conmutación del orden de milisegundos. Sin embargo, en las redes OPS, la función de conmutación óptica debe realizarse paquete a paquete, en un plazo medido en el orden de **nanosegundos**. Esta característica deja un estrecho abanico de dispositivos viables, que forman la base de los conmutadores OPS:

- *Puertas ópticas* [2] basadas en Amplificadores Ópticos Semiconductores (*Semiconductor Optical Amplifier*, SOA). Permiten el bloqueo (estado OFF) o transmisión (estado ON) de una señal óptica, mediante la variación de la corriente de inyección al amplificador.
- *Conversores de Longitud de Onda Sintonizables* (*Tunable Wavelength Converter*, TWC) [3]. Estos dispositivos permiten cambiar la longitud de onda de un paquete de información, dentro de un rango.
- *Arrayed-Waveguide-Gratings* (AWG) [4]. Estos dispositivos son componentes pasivos que permiten encaminar las señales ópticas de sus puertos de entrada a sus puertos de salida, en función de su longitud de onda.
- *Líneas de retardo*. Un aspecto crucial para el desarrollo de las redes OPS es el problema del almacenamiento (*buffering*) de los paquetes ópticos. La lectura-escritura aleatoria de las memorias electrónicas no se puede, hoy en día, trasladar a señales a frecuencias ópticas. Por ello, las memorias de las arquitecturas de conmutación OPS están basadas casi exclusivamente en líneas de retardo, que retrasan la señal entrante durante un lapso fijo que depende de la longitud física de la fibra y la velocidad de propagación de la señal. Para implementar una cola de  $N$  posiciones para paquetes de 1  $\mu$ s, son necesarias  $N$  líneas de retardo de longitudes temporales  $0, \dots, N-1$   $\mu$ s. Como ejemplo, teniendo en cuenta que la señal óptica recorre aproximadamente 200m/ $\mu$ s, el diseño de un conmutador OPS con una cola de 50

posiciones de memoria requeriría 245 km de fibra para las líneas de retardo del conmutador, algo claramente inviable.

En una red troncal OPS las conexiones de tráfico entre los extremos de la red se establecen mediante un circuito virtual permanente, denominado OPP (*Optical Packet Path*). Los paquetes de un mismo OPP siguen una secuencia fija de saltos desde el nodo de ingreso hasta el nodo de salida de la red. Se distinguen dos modos de operación [5]: (i) SHWP, donde para cada OPP, la longitud de onda de transmisión en cada salto se fija durante el establecimiento del circuito, (ii) SCWP, donde los paquetes de cada OPP no tienen una longitud de onda asignada en cada salto. En este modo los nodos de conmutación tienen libertad de elegir la longitud de onda de salida de los paquetes ópticos. Este grado de libertad extra disponible permite una mayor ganancia de multiplexación estadística del tráfico.

El Grupo de Ingeniería Telemática (GIT) de la Universidad Politécnica de Cartagena trabaja actualmente en la evaluación de prestaciones de arquitecturas de conmutación OPS, en ambos modos de operación. Como resultado de este trabajo, se han propuesto mecanismos en modo SCWP que permiten reducir las necesidades de almacenamiento de los nodos, hasta incluso 2 posiciones de memoria para probabilidades de pérdida de  $10^{-9}$ , operando a cargas 0.8 y 0.9 (tráfico Bernoulli uniforme) [6]. Más aún, se ha mostrado que, incluso a estas cargas, el retardo medio de la red no se hace inestable, lo que permitiría a las empresas operadoras hacer trabajar la red de transporte a cargas más elevadas que las redes de paquetes convencionales. Estos resultados acercan la viabilidad de la Conmutación Óptica de Paquetes, al atacar uno de sus puntos críticos de coste.

La diversidad de arquitecturas de conmutación propuestas en la literatura, patrones de tráfico específicos de redes OPS, y modos de operación SHWP/SCWP, conforman un complejo abanico de opciones de diseño en las redes OPS, que deben ser evaluadas. Hasta el conocimiento de los autores, se han presentado dos herramientas de simulación para arquitecturas OPS en la literatura. En [7] se describe una herramienta de simulación diseñada para redes OPS asíncronas no ranuradas, rígida en el sentido de que no existe la posibilidad de variar la arquitectura de conmutación a evaluar. Por otro lado, la herramienta SIMON (SIMulator of Optical NETWORKS) [8] desarrollada en el Politécnico di Torino al amparo del proyecto DAVID, es orientada a OPS síncrono. Sin embargo, presenta el mismo problema de falta de flexibilidad al no permitir variar la arquitectura de conmutación a evaluar. En este artículo, se describe la herramienta de simulación oPASS (*Optical PACKET Switch Simulator*), diseñada específicamente para la evaluación de prestaciones de arquitecturas de conmutación OPS síncrona-ranurada. oPASS ha sido y es empleada en estudios de evaluación de prestaciones de arquitecturas de conmutación OPS realizados por el grupo GIT.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

La herramienta oPASS ha sido implementada mediante el entorno de simulación de redes de libre distribución

OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*) [9]. OMNeT++ es un entorno basado en eventos discretos, modular y orientado a objetos.

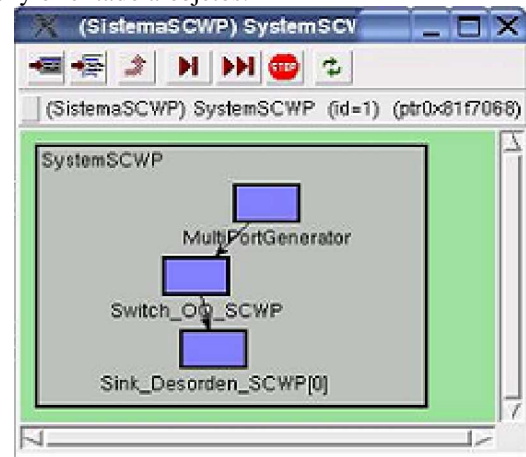


Fig 1. Herramienta de Simulación. Entorno gráfico

El área de aplicación de esta herramienta se centra, principalmente, en la simulación de redes de comunicación. Debido a su arquitectura genérica y flexible, OMNeT++ también es utilizado en otras áreas de investigación, como el modelado de sistemas multiprocesadores, validación de arquitecturas hardware, rendimiento en sistemas software, etc. OMNeT++ se estructura mediante la interconexión de componentes, implementados como módulos en C++. Los escenarios de simulación se construyen enlazando estos módulos básicos entre sí. La descripción de los escenarios se configura flexiblemente, mediante un lenguaje tipo *script* propio, llamado NED. El entorno OMNeT++ se compone de:

- Librerías kernel para la simulación, y compilador para el lenguaje de descripción de topologías NED (nedc).
- GUI para la ejecución de simulaciones, ejecución de la simulación con Tkenv y línea de comandos.
- Herramientas para visualizar los vectores gráficos (Plove), utilidades (generación de semillas de números aleatorios, creación de ficheros "Makefile", etc.)

### A. Arquitectura de la herramienta de simulación

Un escenario de simulación oPASS se compone de tres módulos: Generador de tráfico, Conmutador y Sumidero, interconectados como indica la figura 1.

El módulo Generador de tráfico produce en cada ranura temporal a lo sumo un paquete óptico, por cada una de las  $n_{in} \cdot N_{in}$  puertas de salida, conectadas a cada uno de los  $n_{in} \cdot N_{in}$  puertos de entrada del conmutador. El conmutador tiene  $N_{in}$  fibras de entrada, con  $n_{in}$  longitudes de onda por fibra, y  $N_{out}$  fibras de salida, con  $n_{out}$  longitudes de onda por fibra. Los  $n_{out} \cdot N_{out}$  puertos de salida del conmutador se enlazan al módulo Sumidero que captura los estadísticos.

Para modelar la llegada de paquetes a una fibra de entrada consistente en  $n$  longitudes de onda, se han implementado los siguientes generadores de tráfico:

- SHWP/SCWP Bernoulli: Para cada puerto de entrada del conmutador se genera un paquete con probabilidad constante  $p$  igual al parámetro carga de la simulación. En cada ranura temporal se generan una media de  $np$  paquetes por fibra. En modo SHWP, la fibra y longitud

de onda de salida del conmutador se fijan en el generador. En modo SCWP, la longitud de onda de salida no queda determinada por el generador, sino que es fijada por el planificador de la arquitectura de conmutación.

- SHWP/SCWP *On-Off*: El generador implementado es el propuesto en [15]. En el caso SHWP, el tráfico generado por cada puerto, coincide con el modelo *On-Off* clásico, como el propuesto en [10], basado en tres parámetros: carga por puerto de entrada, longitud media de ráfaga ( $\beta$ ), y probabilidad de creación de paquete durante los periodos *On*. Para el caso SCWP, se ha implementado el modelo de tráfico propuesto en [15]. Se trata, hasta el conocimiento de los autores, del primer modelo de tráfico a ráfagas, propuesto para redes OPS SCWP. Para cada fibra de entrada, consiste en la yuxtaposición de una fuente de tráfico a ráfagas, generando hasta  $n_{in}$  paquetes por ranura temporal, conectada a un repartidor *round-robin* de los paquetes en las longitudes de onda de la fibra.

El módulo Conmutador procesa el tráfico procedente de los  $n_{in}N_{in}$  puertos de entrada y lo conmuta hacia los distintos  $n_{out}N_{out}$  puertos de salida. Los módulos implementados son:

- *Conmutadores de colas a la salida*. Para simular arquitecturas OPS con capacidad de emular colas a la salida [6]. Se han implementado dos módulos (modo SHWP y SCWP). El algoritmo de planificación implementado en ambos casos es el propuesto en [11], tiene las propiedades de proporcionar las prestaciones óptimas en arquitecturas de colas a la salida, manteniendo el orden entre paquetes. En [12] se muestran ejemplos de arquitecturas OPS con este tipo de conmutador.
- Conmutador IBWR: La arquitectura *Input-Buffered Wavelength-Routed switch* fue propuesta originalmente en [13], y adaptada a los modos de operación SHWP/SCWP en [14] (figura 2). Tiene las ventajas de un menor coste hardware y una mejor escalabilidad frente a las arquitecturas con capacidad de emular colas a la salida. En [14] se mostró que el problema de optimización inherente a esta arquitectura, para la asignación de retardo a los paquetes entrantes, puede expresarse como un problema de emparejamiento en grafos bipartitos. Se han implementado dos versiones de planificadores. El primero de ellos, es el planificador secuencial, propuesto en [14], que visita secuencialmente los puertos de entrada del conmutador, asignando el retardo más corto disponible en cada momento. El segundo, el planificador PDBM (*Parallel Desynchronized Block Matching*) propuesto en [15]. La herramienta oPASS ha sido la empleada para la evaluación de prestaciones en las citadas referencias.

## B. Estadísticos

El módulo Sumidero recoge y almacena en disco los parámetros clásicos de evaluación de redes de paquetes: probabilidad de pérdida de paquetes y función de distribución de probabilidad del retardo de paquete. Como funcionalidad peculiar, oPASS ha sido diseñado para recopilar estadísticos específicos para la evaluación del desorden en redes OPS. El problema del orden entre paquetes en redes OPS síncronas ha sido investigado en [5] y [11]. En una red OPS, el orden entre paquetes consecutivos pertenecientes al mismo OPP se debe preservar para evitar la necesidad de etapas de reordenamiento electrónicas en los nodos de salida de la red. Se estima que la memoria y procesamiento necesario serían demasiado costosas a las velocidades asociadas a la red troncal. Esto implica que el orden entre paquetes debe mantenerse *en cada salto*. Para ello, los nodos de conmutación deben disponer de información sobre el orden entre los paquetes entrantes. Las soluciones basadas en campos contadores dentro de las cabeceras ópticas no son deseadas para mantener el tamaño de las cabeceras al mínimo (algo especialmente relevante en redes OPS). La alternativa es definir un criterio de orden entre paquetes, basado en *tiempo de llegada de los mismos, y longitud de onda de entrada*.

En [11] se muestra que el criterio de orden *round-robin* propuesto por los autores es superior al criterio propuesto dentro del proyecto WASPNET [5], al asegurar una utilización balanceada de todas las longitudes de onda en las fibras de la red, para cualquier patrón de tráfico. Los resultados presentados en [11] han sido obtenidos mediante la herramienta oPASS. Esta herramienta extrae los siguientes estadísticos indicadores del desorden entre paquetes:

- Función de distribución de la variable aleatoria bidimensional  $X(\Delta tin, \Delta d)$ . Para cada paquete  $p_i$  saliente del conmutador se calcula (i)  $\Delta t_{in}$ : la diferencia entre el tiempo de entrada del paquete  $p_i$ , y el tiempo de entrada del paquete anterior en la secuencia  $p_{i-1}$ ,  $\Delta t_{in}=0,1,\dots$ , (ii)  $\Delta d$ : la diferencia entre el retardo asignado al paquete  $p_i$  y al paquete  $p_{i-1}$ ,  $\Delta d=-B_{max},\dots,0,\dots,B_{max}$ , siendo  $B_{max}$  el retardo máximo asignable a un paquete. Nótese que un paquete adelanta en tiempo a su predecesor (produciendo desorden), en aquellos casos en que  $\Delta t_{in} < \Delta d$ .
- La probabilidad de desorden, definida como la probabilidad de que un paquete adelante a su predecesor, según el criterio WASPNET, o según el criterio *round-robin*. Para los casos en que (en modo SCWP) dos paquetes del mismo OPP sean transmitidos simultáneamente, es necesario comprobar la longitud de onda de salida para la determinación del posible desorden (ver [5] y [11] para más detalles).

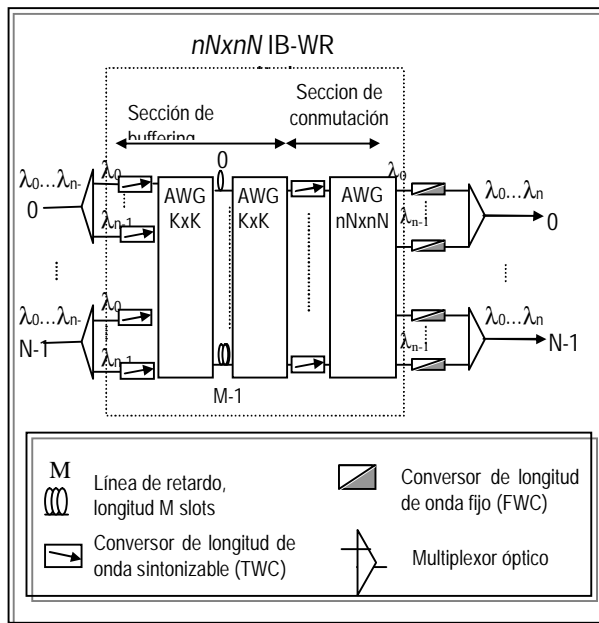


Fig 2: Conmutador IBWR

### III. RESULTADOS

En [11][14][15] se describen resultados de evaluación de arquitecturas OPS, obtenidos a través de la herramienta oPASS. Como ejemplo se incluye la figura 3, que ilustra el retardo medio por paquete en función de la carga del conmutador, en un conmutador IBWR simétrico para los valores  $n=\{2,4,8,16\}$ ,  $N=\{2,4,8,16\}$ , en los casos  $nN=32$ .

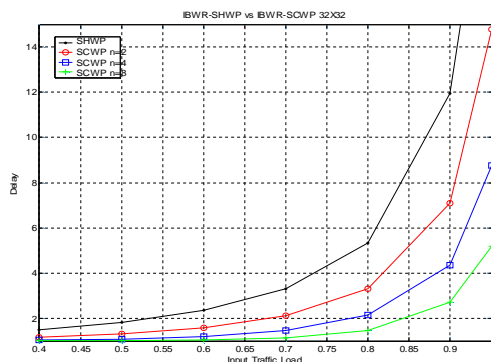


Fig 3. Retardo de paquetes en función de la carga de tráfico para conmutador IBWR 32X32

Se observa claramente cómo el retardo medio de paquete obtenido es inferior cuando el conmutador trabaja en modo SCWP, y menor cuánto mayor sea el número de longitudes de onda por fibra, debido a la mejor ganancia de multiplexación. Como efecto a destacar, se observa como, para este caso, el retardo se mantiene estable incluso a cargas altas. Esto permitiría a las empresas operadoras hacer trabajar a las redes OPS a cargas más elevadas de las habituales, frente a las redes de conmutación de paquetes convencionales.

### IV. CONCLUSIONES

La herramienta de simulación oPASS ha sido diseñada para la evaluación de prestaciones de arquitecturas de conmutación OPS. La herramienta ha sido construida sobre el entorno OMNET++, es flexible y fácilmente extensible con nuevos patrones de tráfico y arquitecturas de conmutación. La herramienta oPASS ha sido y continúa siendo empleada en varios estudios de evaluación de prestaciones en redes OPS llevadas a cabo por el Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad Politécnica de Cartagena.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto nacional TEC2004-05622-C04-02/TCM (ARPaq).

### REFERENCIAS

- [1] Dittman L., *et al.*, "The European IST Project DAVID: A Viable Approach Toward Optical Packet Switching", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 7, Sep. 2003, pp. 1026-1040.
- [2] Stubkjaer K. E., "Semiconductor Optical Amplifier-based All-Optical Gates for High-Speed Optical Processing", *IEEE Journal Sel. Quant. Elec.*, vol. 6, 2000, pp. 1428-35.
- [3] White I., *et al.*, "Wavelength Switching Components for Future Photonic Networks", *IEEE Communications Magazine*, September 2002, pp. 74-81.
- [4] Takahashi H., Suzuki S., Kato K., Nishi I., "Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometre resolution", *Electronic Letters*, vol. 26, 1990, pp. 87-88.
- [5] Hunter D., *et al.*, "WASPNET: A Wavelength Switched Packet Network", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 3, March 1999, pp. 120-129.
- [6] P. Pavon-Marino, J. Garcia-Haro, J. Malgosa-Sanahuja, F. Cerdan, "Scattered Versus Shared Wavelength Path Operation, Application to Output Buffered Optical Packet Switches. A comparative study", *SPIE/Kluwer Optical Networks Magazine*, vol. 4, no. 6, November/December 2003, pp. 134-145.
- [7] W. Vanderbauwhede, D. Harle, "Modelling and Characterisation of an Asynchronous Optical Packet Switch for Direct IP over WDM", *International network Optimization Conference INOC 2003*, Evry/Paris, (France), October 2003.
- [8] A. Bianco *et al.*, "Design of Optical Packet Switching Networks", *Workshop on IEEE GLOBECOM 2002*, Taipei (Taiwan), November 2002.
- [9] A. Vargas, "The OMNeT++ Discrete Event Simulation System", *European Simulation Multiconference ESM 2001*, Prague (Czech Republic), June 2001.
- [10] S. C. Liew, "Performance of Various Input-buffered and Output-buffered ATM Switch Design Principles under Bursty Traffic: Simulation Study", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 42, no. 2/3/4, April 1994, pp. 1371-1379.
- [11] Pavon-Mariño P., Gonzalez-Castaño F.J., Garcia-Haro J., "Round-Robin wavelength assignment: A new packet sequence criterion in Optical Packet Switching SCWP networks", accepted for publication in *European Transactions on Telecommunications*.

- [12] Guillemot C., *et al.*, "Transparent optical packet switching: the European ACTS KEOPS project approach", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 12, Dec. 1998, pp. 2117-2134.
- [13] Zhong W., Tucker R., "Wavelength routing-based photonic packet buffers and their applications in photonic packet switching systems", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 10, Oct. 1998, pp. 1737-1745.
- [14] Pablo Pavon-Marino, Joan Garcia-Haro, Josemaria Malgosa-Sanahuja, Fernando Cerdan, "Maximal Matching Characterization of Optical Packet Input-Buffered Wavelength Routed Switches", *Proc. of 2003 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR 2003)*, Torino (Italy), June 2003, pp. 55-60.
- [15] P. Pavon-Mariño, J. Garcia-Haro, A. Jajszyk, "Parallel Desynchronized Block Matching: A Feasible Scheduling Algorithm for the Input-Buffered Wavelength-Routed Switch", submitted to *IEEE/ACM Transactions on Networking*.