

# Evaluación de la red óptica metropolitana multi-anillo del proyecto DAVID

Davide Careglio, Guillermo Giner, Josep Solé-Pareta, Salvatore Spadaro y Gabriel Junyent

Universitat Politècnica de Catalunya  
Centre de Comunicacions Avançada de Banda Ampla - CCABA  
Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona  
e-mail: {careglio, gginer, pareta}@ac.upc.es, {spadaro, junyent}@tsc.upc.es

**Resumen**— En este artículo se presentan los resultados más significativos obtenidos durante la evaluación de prestaciones y comportamiento de la red óptica metropolitana multi-anillo del proyecto DAVID que la UPC ha realizado en el marco de dicho proyecto.

## I. INTRODUCCIÓN

EN ESTOS últimos años se está produciendo un continuo aumento del volumen de tráfico en las redes de comunicaciones debido, principalmente, al crecimiento de las propias redes y a la proliferación de nuevas aplicaciones que combinan voz, datos y vídeo. Este crecimiento de la demanda de ancho de banda, unido a mayores exigencias en las prestaciones asociadas (tiempos de respuesta, fiabilidad, privacidad, QoS, etc.) requiere un replanteamiento en el desarrollo de las redes de transporte públicas. Actualmente, estas nuevas necesidades se están atendiendo con la implantación de la tecnología (D)WDM (*Dense Wavelegh*t *Division Multiplexing*) y migrando los sistemas punto-a-punto hacia interconexiones basadas en redes de conmutación de circuitos ópticos (*Optical Circuit Switching*). En particular, en este último campo están trabajando los principales foros de estandarización (ITU, IETF, OIF) a través del desarrollo del paradigma ASON/GMPLS (*Automatic Switching Optical Network / Generalized Multiprotocol Lambda Switching*) [2]. ASON/GMPLS es una solución que prevee un uso relativamente estático de las longitudes de onda, no aprovechando todo el potencial que la tecnología óptica puede ofrecer con una explotación más dinámica de los recursos (multiplexación estadística). Como alternativa, la conmutación de paquetes ópticos [3] (*Optical Packet Switching*, OPS en adelante) que pretende ser una solución válida (a largo plazo) que aproveche mejor de la tecnología óptica proporcionando mayor rendimiento y flexibilidad.

En este contexto se enmarca el proyecto IST DAVID (*Data And Voice Integrated over DWDM*, IST-1999-11742) [4]. Este proyecto propone una solución viable para el entorno OPS, desarrollando nuevos conceptos y tecnologías válidas para futuras redes de telecomunicaciones de alta capacidad totalmente ópticas.

La arquitectura de red propuesta en el proyecto DAVID se

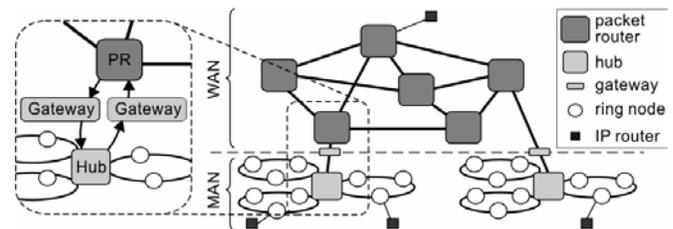


Figura 1. Arquitectura de la red DAVID

ilustra en la Figura 1 y abarca tanto los entornos de área metropolitana (MAN en la Figura 1) como los de área extendida (WAN en la Figura 1). Las redes metropolitanas se componen de uno o más anillos ópticos interconectados a un *Hub* centralizado. Cada anillo interconecta diversos nodos que utilizan un protocolo MAC (*Medium Access Control*) para acceder al medio compartido. Los nodos son, de hecho, los dispositivos encargados de catalizar y encaminar debidamente el tráfico de otras redes de jerarquía inferior (como por ejemplo enrutadores IP). El *Hub* hace de punto de interconexión entre los distintos anillos de la MAN y entre éstos y la WAN, a través de un dispositivo conocido como *Gateway*. La red de área extendida es de tipo malla e interconecta enrutadores totalmente ópticos (*Packet Router*, PR en la Figura 1). La arquitectura de estos PRs se basa en un conmutador óptico de tipo *Broadcast&Select* como el descrito en el proyecto KEOPS [5]. El objetivo es conseguir una red que trabaje totalmente a nivel óptico y en la que sólo en los nodos de acceso sea necesaria una conversión electro/óptica.

Dentro de los múltiples campos de trabajo del proyecto DAVID y en lo que concierne al entorno metropolitano, la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC), a través del *Centre de Comunicacions Avançades de Banda Ample* (CCABA), es la responsable de diferentes tareas:

- Evaluar y optimizar el protocolo MAC propuesto en el proyecto a través de simulaciones a escala real de la MAN.
- Contribuir al diseño de mecanismos para proporcionar calidades de servicios (QoS).
- Estudiar, evaluar y comparar posibles arquitecturas alternativas.

En este artículo se presentan los resultados más relevantes correspondientes a la primera de estas tareas.

El resto del artículo está organizado de siguiente manera. En el apartado II, se describe de forma concisa el protocolo MAC y la arquitectura de red. El apartado III presenta el escenario de simulación. En el apartado IV se muestran los resultados obtenidos y, finalmente, en el apartado V se exponen las conclusiones.

## II. LA RED METROPOLITANA DAVID

La red de área metropolitana DAVID [6] (Figura 2) consta de varios anillos ópticos unidireccionales interconectados mediante un Hub central. Este dispositivo es un conmutador óptico espacial sin bloqueo de 4×4 puertos, en el que uno o más de estos puertos se dedican a la conexión con la WAN a través del *Gateway*, relegando al resto para interconectar los diferentes anillos metropolitanos. Cada anillo se crea a partir de una fibra óptica capaz de transportar simultáneamente hasta un máximo de 32 longitudes de onda. A una velocidad de transmisión de 10 Gbps, el sistema podría operar con un *throughput* teórico de 1.28 Tbps (32 longitudes de onda por 4 puertos por 10 Gbps).

Por razones tecnológicas, de escalabilidad y de flexibilidad, no es factible en la actualidad operar con las 32 longitudes de onda simultáneamente. Para solucionar este inconveniente, se dividen los anillos físicos a nivel lógico, creándose bandas de 4 longitudes de onda cada una. Es decir, si bien todos los nodos se conectan a una misma fibra, únicamente se les permite operar en algunas de las bandas, de forma que a efectos prácticos un anillo físico actúa como 8 anillos lógicos disjuntos. El sistema cuenta además, con una longitud de onda adicional que se emplea para tareas de control y gestión de la red, transportando toda la información requerida por el protocolo MAC.

Las longitudes de onda de cada anillo lógico están ranuradas, es decir, transportan paquetes ópticos (ranuras) de duración fija (típicamente de entre 500 ns y 1  $\mu$ s). Estas ranuras están perfectamente alineadas entre sí, de forma que en un mismo anillo lógico, se agrupan todas formando una multi-ranura (una ranura de cada una de las longitudes de onda asignadas al anillo lógico). Una multi-ranura es una unidad indivisible que el *Hub* conmuta de manera conjunta entre sus diferentes puertos lógicos (cada uno de los 4 puertos físicos del *Hub* se estructura a nivel lógico en 8 puertos). Estas multi-ranuras se organizan en última instancia en tramas de duración fija de  $F$  multi-ranuras.

De ello se desprende que la arquitectura de la red metropolitana presenta un esquema de acceso que es una combinación WDMA/TDMA (*Wavelength Division Multiple Access y Time Division Multiple Access*).

### A. Arquitectura del Hub

El *Hub* se ocupa de entrelazar los diferentes anillos e intercomunicarlos con la WAN actuando como un conmutador espacial óptico. A efectos prácticos, dado que las adaptaciones necesarias para la interconexión con la WAN las realiza el *Gateway*, el *Hub* trata este puerto como si fuera otro anillo físico. Así, en cada ranura temporal, el *Hub* aplica una

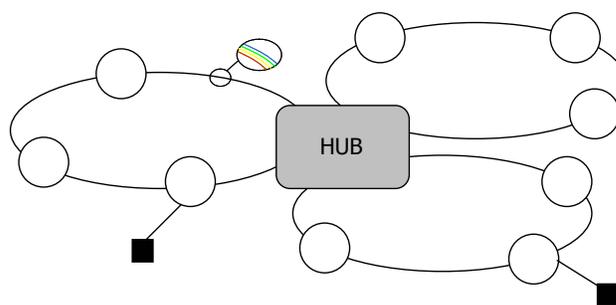


Figura 2. Arquitectura de la red metropolitana

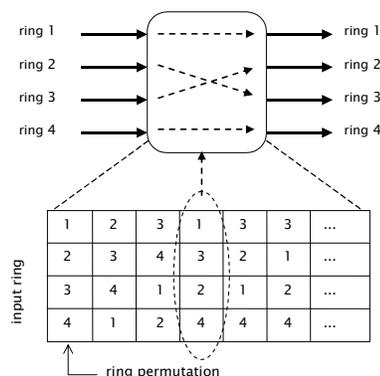


Figura 3. Funcionamiento esquemático del Hub

permutación entre los distintos anillos (operación que equivale a conmutar las multi-ranuras). La Figura 3 ilustra un ejemplo donde el *Hub* aplica una permutación empleando 4 anillos lógicos. Puesto que el número de longitudes de onda es igual para cada anillo, no se pueden dar congestiones, lo que permite la ausencia de colas en el *Hub* y lo libra de posibles bloqueos.

La secuencia de permutaciones se modifica de forma dinámica cada  $F$  ranuras temporales según un algoritmo de asignación de recursos (*scheduling*). Este algoritmo se basa tanto en medidas realizadas por el propio *Hub* sobre la distribución de carga en la red, como en señales de control enviadas por los nodos. El *Hub*, de acuerdo a esta secuencia, marca cada multi-ranura (usando las ranuras de control), indicando el próximo anillo hacia el que se conmutará la multi-ranura a su vuelta al *Hub*. De esta manera, los nodos conocen el destino próximo de la multi-ranura y pueden transmitir, en las ranuras que encuentren libres, los paquetes pendientes de envío para los nodos ubicados en el anillo destino hacia el que se dirige la multi-ranura.

En literatura existen varios algoritmos, tanto óptimos como heurísticos, que se adaptan a este problema de asignación de recursos [7]. De las diferentes propuestas, se ha decidido emplear el algoritmo de *Von Neumann-Birkhoff* [8] que es, actualmente, el que proporciona una solución óptima con una complejidad computacional menor.

### B. Arquitectura de los nodos

Los nodos de acceso se encargan de insertar tráfico en la red proveniente de los diferentes clientes (generalmente paquetes IP). Siendo los anillos ranurados y los paquetes

clientes típicamente de longitud variables, los nodos se encargan de segmentar o agregar los paquetes en ranuras de longitud fija. Una vez adaptados debidamente, los nodos almacenan los paquetes en colas eléctricas organizadas según anillo destino, de forma que se reduzca el *Head-of-Line blocking* [9]. Para la transmisión y recepción de los paquetes ópticos de datos, los nodos están equipados con un láser y un receptor sintonizables, mientras usan un láser y un receptor fijos para la transmisión y recepción del canal de control.

El protocolo MAC arbitra el acceso de los nodos a las ranuras, regulando tanto la dimensión temporal como la frecuencial. Para implementarlo se hace uso de la información sobre el estado de cada ranura de la multi-ranura contenida en la ranura de control. Es por ello que los nodos monitorizan continuamente esta información para poder identificar las ranuras libres y, al mismo tiempo, las ranuras destinadas a ellos. Así, sólo la información de control se convierte electro-ópticamente, mientras las ranuras de datos se quedan siempre en el dominio óptico desde su transmisión hasta su recepción.

El protocolo MAC se encarga además de asegurar la imparcialidad (*fairness*) de acceso de los nodos a los recursos compartidos. De hecho, las redes con topología de anillo son especialmente sensibles a problemas de parcialidad [10], debido a que por su configuración, algunos nodos tienden a tener mayor probabilidad de ocupar recursos que otros. Para resolver este problema, se regula el acceso al medio mediante un mecanismo que garantice equidad. En el caso de la red DAVID, se ha considerado una versión para entorno multi-anillo del conocido mecanismo del SAT usado en la red *MetaRing* [10]. En estas redes se emplea una señal de control de tipo *token*, conocida como SAT (de *SATisfied*), que salta de nodo a nodo una vez se hayan satisfecho una serie de requisitos (*store-and-forward*). Para el caso concreto de la estructura multi-anillo, se emplea un SAT para cada par de anillos origen-destino. Cuando un nodo de un anillo  $i$  recibe el  $SAT_{ij}$ , conjuntamente recibe el permiso de transmitir  $Q$  paquetes (cuota de transmisión) a cualquier nodo del anillo  $j$ . Si el nodo ha transmitido  $Q$  paquetes o la correspondiente cola está vacía, entonces envía el  $SAT_{ij}$  al siguiente nodo del anillo. Una descripción más detallada de este mecanismo se puede encontrar en [6].

### C. Razones para la elección de la topología multi-anillo

Uno de los objetivos del proyecto DAVID es proponer una solución viable de red OPS para un entorno de área metropolitana, capaz de proporcionar alto rendimiento para las futuras redes ópticas de alta capacidad. El consorcio del proyecto se ha decantado por el empleo de una topología multi-anillo por las siguientes razones:

- altos rendimiento gracias al reuso espacial (*Spatial Reuse*) de los recursos;
- fácil implementación de mecanismos de protección en caso de fallos;
- gestión de recursos fácil y flexible gracias al control de acceso semi-distribuido;
- mejor topología para la introducción de la tecnología OPS

TABLA 1

PARÁMETROS DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

Parámetro	Símbolo	Valor
Anillos	$N$	16
Nodos por anillo	$N$	10
Longitudes de onda	$W$	4
Tamaño de la ranura	$P_s$	1 $\mu$ s
Longitud de las fibras	$L$	100 km
Round Trip Time	$RTT$	0,5 ms
Tamaño de la trama	$F$	10 ms
Cuota de transmisión	$Q$	500 paquetes
Velocidad de transmisión	$B_w$	10 Gbps
Throughput de la red	$N_t$	0,64 Tbps

siendo a la vez de bajo coste y de mejor rendimiento;

- mejor escalabilidad siendo relativamente fácil introducir nuevos nodos.

### III. ESCENARIO DE SIMULACIÓN

Para evaluar las prestaciones de la red metropolitana, se ha implementado un simulador a escala real. Para este estudio se ha configurado con  $N = 16$  anillos lógicos, cada uno con  $n = 10$  nodos para un total de 160 nodos. Cada anillo transporta  $W = 4$  longitudes de onda a un velocidad de transmisión de  $B_w = 10$  Gbps. Estos valores suponen un *throughput* máximo total de la red de 640 Gbps. Siendo la duración de cada ranura óptica de  $P_s = 1 \mu$ s (1250 bytes). Se han considerado, además, todos los anillos de la misma longitud,  $L = 100$  km, lo que supone que las multi-ranuras necesitan  $RTT = 0,5$  ms (*Round Trip Time*) para dar una vuelta completa a cada anillo. Finalmente, se han tomado tramas de  $F = 20.000$  ranuras temporales, lo que equivale a 20 RTTs y a 10 ms. Vale la pena recordar que el *Hub* genera una nueva secuencia de permutaciones cada trama, por lo tanto en este caso, cada 10 ms. La Tabla 1 resume estos valores.

#### A. Caracterización del tráfico

Para el simulador se han modelado fuentes de tráfico IP de tipo *self-similar*, creadas a partir de la agregación de 16 fuentes *ON-OFF* idénticamente e independientemente distribuidas [11]. Los periodos de ON y OFF se alternan estrictamente y sus duraciones siguen una distribución de Pareto con parámetro  $\alpha = 1,2$ , lo que supone un parámetro *Hurst* de  $H = 0,9$  [11]. En lo que concierne a la duración de los paquetes IP, se ha considerado la distribución estadística presente en [12] de la que se extrapola que el 87% de los paquetes IP requieren un único paquete óptico, mientras que el resto necesita dos.

Se han considerado diferentes escenarios de simulación contruidos *ad-hoc* para estudiar y analizar las características del protocolo MAC. Por ello, se han implementado tres matrices diferentes de tráfico: una uniforme, una no balanceada entre anillos y, por ultimo, una no balanceada

entre nodos. La matriz de tráfico uniforme se ha usado para determinar el máximo *throughput* alcanzable por la red, así como para disponer de un escenario referencia para estudios sucesivos. La matriz de tráfico no balanceada entre anillos prevé una relación de carga de 7 a 1 entre el tráfico intra-anillo (tráfico generado en un anillo con destino el propio anillo) y el tráfico inter-anillo (tráfico generado en un anillo con destino uno cualquiera de los restantes). Finalmente, en la matriz de tráfico no balanceada entre nodos, los nodos envían paquetes exclusivamente al primer nodo de cada anillo. Estas dos últimas matrices se han empleado con el fin de verificar el correcto funcionamiento del mecanismo de imparcialidad tanto a nivel de anillo, como de nodo.

#### IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A continuación, se presentan algunos de los resultados más significativos de este estudio de evaluación, divididos en tres apartados. El primer apartado presenta los resultados de referencia, obtenidos a partir de la matriz de tráfico uniforme. El segundo apartado se dedica a comprobar el mecanismo de imparcialidad. Por último, el tercer apartado muestra unas primeras optimizaciones del protocolo MAC y los relativos resultados.

##### A. Prestaciones sin reuso espacial

En la Figura 4a, se ilustra el *throughput* total y el *throughput* de los anillos 0, 4, 8 y 12 en función de la carga de tráfico ofrecida a la red considerando la matriz de tráfico uniforme. Se muestra sólo el *throughput* de los anillos 0, 4, 8 y 12 puesto que el resto, dada la simetría de la matriz de tráfico, presentan un comportamiento afín. Reseñar que el rendimiento máximo llega a 0,935, siendo el comportamiento de cada todos los anillos muy similar.

La Figura 4b ilustra el retraso medio destino a destino de los mismos anillos en función de la carga de tráfico. Se puede ver que, para valores de carga de tráfico que no creen congestión (valores inferiores a 0,95 aproximadamente), el retraso medio se mantiene prácticamente igual a un RTT (500 ranuras), mientras que, para valores mayores de carga, el retraso aumenta muy rápidamente.

##### B. Verificación del mecanismo de imparcialidad

Tal y como se ha mencionado, una red con topología de anillo presenta problemas para garantizar la imparcialidad en caso de tráfico no uniforme. En una red multi-anillo como la red DAVID, este problema se puede dar tanto entre anillos como entre nodos de un mismo anillo. Por lo tanto, se ha estudiado el comportamiento de la red cuando se la somete a tráficos no uniforme, tanto entre anillos (Figura 5) como entre nodos (Figura 6).

Para el caso entre anillos, se ha estudiado el empleo del ancho de banda en función de la carga de tráfico (Figura 5a) usando la matriz de tráfico no balanceada entre anillos. Se puede ver que mientras la red no está congestionada (valores de la carga de tráfico inferior a 0,6), el ancho de banda usado por cada anillo crece proporcionalmente al aumentar el tráfico.

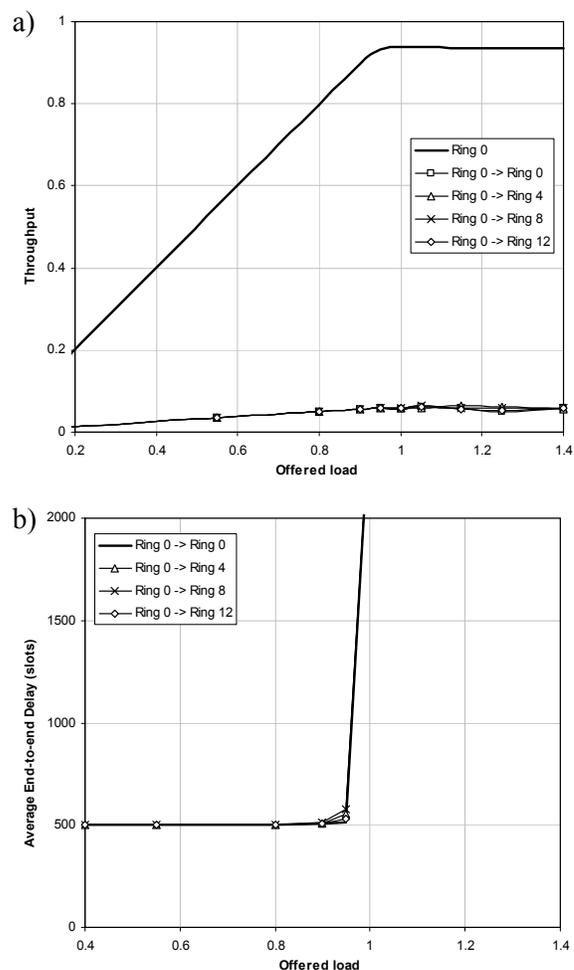


Figura 4. Trafico uniforme: a) Throughput, b) Retraso medio destino a destino

En cambio, una vez que la red se congestiona, el protocolo MAC, a través del mecanismo de imparcialidad, limita el ancho de banda usado por el anillo con mayor carga. De modo que el ancho de banda usado por el resto de anillos siga creciendo proporcionalmente con la carga de tráfico. El mismo comportamiento se puede apreciar en la grafica del retraso medio (Figura 5b): el del tráfico intra-anillo crece rápidamente para cargas superior a 0,6, mientras que el del tráfico inter-anillo se mantiene alrededor de un RTT hasta valores de carga de 1,4.

Para la Figura 6 se ha empleado la matriz de tráfico no balanceada entre nodos. En este caso se han comparado los porcentajes de ancho de banda usado por cada nodo del anillo 0 y considerando tanto los casos de uso y no uso del mecanismo de imparcialidad, así como distintos valores de  $Q$ . Se puede ver que al no emplear el mecanismo de imparcialidad, los primeros nodos acaparan prácticamente todos los recursos disponibles, dejando al resto sin posibilidad de transmitir. En contraposición, al aplicar el mecanismo de imparcialidad, el ancho de banda usado se equipara para cada nodo. De los diferentes valores de  $Q$  ensayados, se extrae que, evidentemente, cuanto más bajo es  $Q$  más equitativo es el acceso, si bien, más bajo es el rendimiento de la red. Existe,

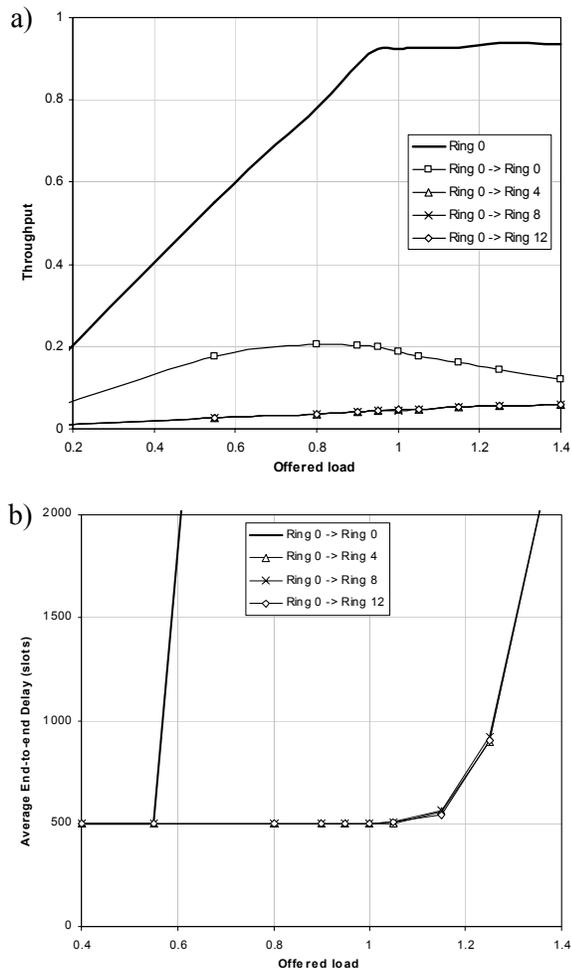


Figura 5. Tráfico no balanceado entre anillos: a) Utilización de ancho de banda por anillo destino del anillo 0, b) Retraso medio destino a destino

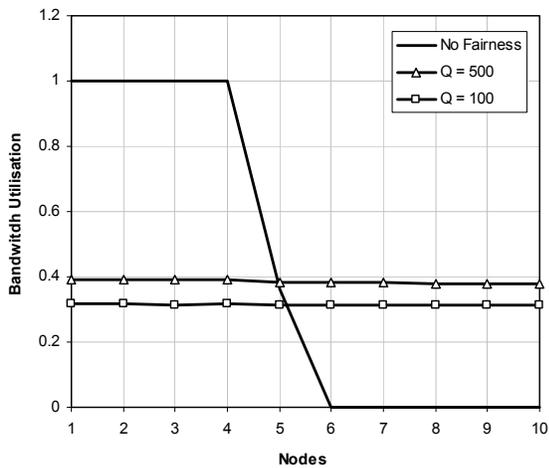


Figura 6. Tráfico no balanceado entre nodos: Utilización de ancho de banda por nodo del anillo 0

pues, una regla de compromiso entre la equidad de los nodos en el acceso a los recursos y el máximo rendimiento alcanzable por la red.

### C. Optimización: reuso espacial

Inicialmente, el protocolo MAC de la red metropolitana, no

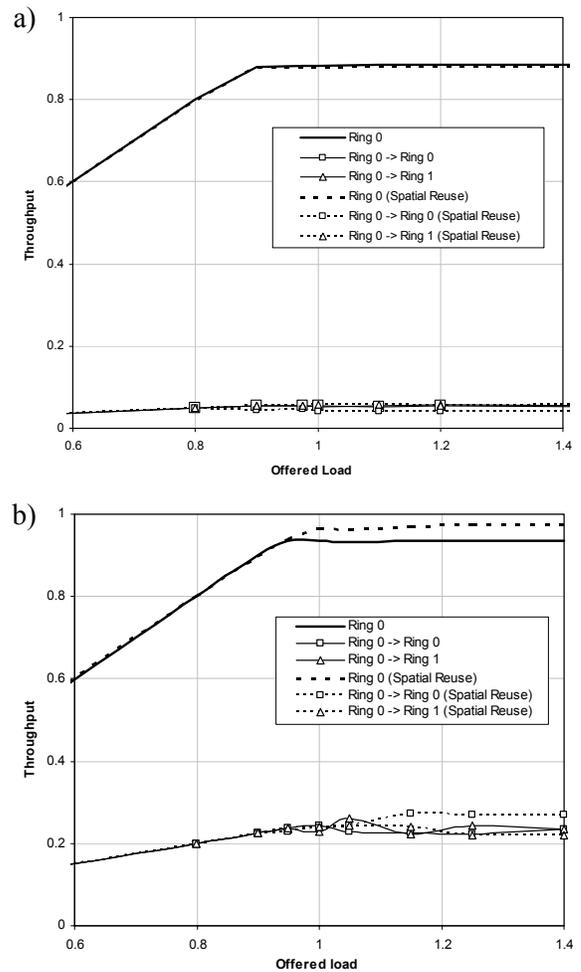


Figura 7. Tráfico uniforme con y sin reuso espacial: a) Throughput considerando 16 anillos, b) Throughput considerando 4 anillos

consideraba la posibilidad del reuso espacial. En el momento en el que un nodo enviaba un paquete a un nodo posterior de su mismo anillo, se obligaba a que el paquete pasara necesariamente por el *Hub* aunque el nodo destinatario hubiera podido recibirlo antes. La razón de ello es que el *Hub* necesita medir la carga de tráfico transmitida y recibida por cada anillo, a fin de poder computar debidamente la secuencia de permutaciones y no crear desequilibrios. Este inconveniente se puede subsanar contando el número de veces que una misma ranura se reutiliza durante su viaje por un anillo. Así el *Hub*, disponiendo de esta información, puede contabilizar correctamente las necesidades de la red y aplicar debidamente el algoritmo de asignación de recursos.

Para este estudio se han considerado dos escenarios: uno que considera 16 anillos y otro que tan solo cuenta con 4 anillos. El resto de los parámetros se han dejado igual que los presentados en la Tabla 1.

En las Figura 7a y Figura 7b se muestran el *throughput* total del anillo 0 y el *throughput* parcial del anillo 0 hacia los anillos 0 y 1, comparando los casos con y sin reuso espacial con en función de la carga de tráfico. Para estas figuras se ha usado la matriz de tráfico uniforme. Concretamente, la Figura 7a ilustra el escenario con 16 anillos, mientras la Figura 7b

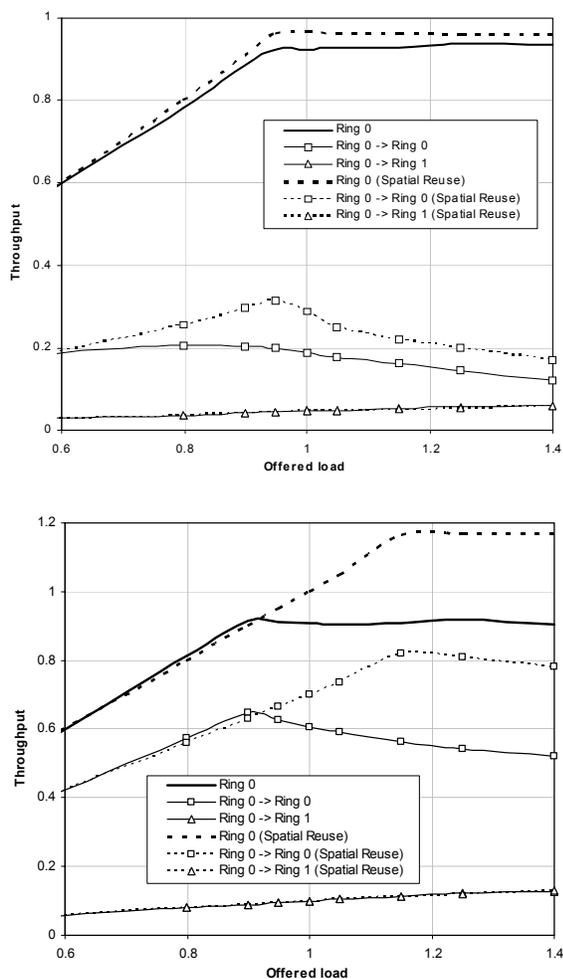


Figura 8. Tráfico no balanceado entre anillos con y sin reuso espacial: a) Throughput considerando 16 anillos, b) Throughput considerando 4 anillos

muestra el de 4 anillos.

Se puede ver en la Figura 7a que las prestaciones con y sin reuso espacial son prácticamente idénticas. En contrapartida la Figura 7b que el emplear el reuso espacial mejora notoriamente el *throughput*. Este resultado es evidente si se tiene en cuenta que el reuso espacial sólo es posible para transmisiones intra-anillo. Así pues, siendo la matriz de tráfico uniforme, en el escenario con 4 anillos sólo una cuarta parte del tráfico es, en media, intra-anillo, mientras que, para el caso de 16 anillos, esta proporción se reduce a una dieciseisava parte.

Las Figura 8a y Figura 8b ilustran las mismas gráficas que las dos anteriores, pero considerando la matriz de tráfico no balanceado entre anillos. En este caso el tráfico es fuertemente intra-anillo y, por lo tanto, los beneficios del reuso espacialson más evidentes. También en este caso se aprecia que cuanto menos son los anillos, mejores prestaciones se obtienen introduciendo el reuso espacial.

Una conclusión que se puede extraer de todo ello es que, en el diseño de la red, se debe tener muy en cuenta los probables perfiles de tráfico. Se debe procurar distribuir acertadamente los nodos y ajustar el número de anillos con el fin de obtener el máximo rendimiento posible. Por ejemplo, es conveniente

ajustar la distribución de los nodos en la red de modo que se maximice el tráfico inter-anillo y, por consiguiente, maximizar el rendimiento de la misma.

## V. CONCLUSIONES

Los resultados de los varios escenarios de simulación presentados en este artículo demuestran que la red metropolitana DAVID se comporta satisfactoriamente. En particular, se ha comprobado que la utilización de los recursos compartidos es imparcial tanto entre anillos como entre nodos. Secundariamente, se ha propuesto una primera optimización del protocolo MAC inicial que supone la inclusión del reuso espacial. Los resultados de esta optimización indican que el reuso espacial incrementa el rendimiento de la red de una cantidad que depende de la topología de la red y del perfil de tráfico. Finalmente, se han argumentado unos criterios de diseño de la red con el fin de optimizar su rendimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido en parte financiado por la CYCIT (proyecto TIC99-0572-C02-02) y por BTextact Technologies (British Telecommunications plc.) a través la participación en el proyecto DAVID (IST-1999-11742).

## REFERENCIAS

- [1] L. Roberts, C. Crump, "US Internet IP Traffic Growth", Caspian Networks, [http://www.caspiannetworks.com/library/presentations/traffic/Internet\\_Traffic\\_081301.ppt](http://www.caspiannetworks.com/library/presentations/traffic/Internet_Traffic_081301.ppt), Aug. 2001
- [2] ITU-T Rec. 8080 "Architecture for the Automatic Switched Optical Network (ASON)"
- [3] D.K. Hunter, I. Andonovic, "Approaches to Optical Internet Packet Switching", IEEE Communications Magazine, Vol. 38, No. 9, pp. 116-122, Septiembre 2000.
- [4] IST DAVID Project, Ref. IST-1999-11742, <http://david.com.dtu.dk>
- [5] C. Guillemot et al., "Transparent Optical Packet Switching: The European ACTS KEOPS Project Approach", Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 12, pp. 2117-2134, Diciembre 1998.
- [6] A. Bianco, E. Leonardi, G. Galante, F. Neri, M. Rundo, "Access Control Protocols for Interconnected WDM Rings in the DAVID Metro Network", Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications (IWDC 2001), Taormina, Italia, Septiembre 2001.
- [7] B. Hajek, and T. Weller, "Scheduling non-uniform traffic in a packet-switching system with small propagation delay", IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 5, no. 6, Dec. 1997, pp. 813-823.
- [8] C. S. Chang, W. J. Chen, H. Y. Huang, "Birhoff-von Neumann input buffered crossbar switches", in Proc. IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv, Israel, March 2000, pp. 1614-1623
- [9] M. Karol, M. Hluckyj, S. Morgan, "Input Versus Output Queuing on a Space Division Switch", IEEE Transactions on Communications, Vol. 35, No. 12, pp. 1347-1356, Diciembre 1987.
- [10] I. Cidon, Y. Ofek, "MetaRing - A Full Duplex Ring with Fairness and Spatial Reuse", IEEE Transactions on Communications, Vol. 14, No. 1, pp. 110-119, Enero 1993.
- [11] W.E.Leland, M.S.Taqqu, W.Willinger, and D.V.Wilson, "On the Self Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.2, No.1, pp.1-15, Febrero 1994.
- [12] K. Thompson, G. J. Miller, and R. Wilder, "Wide-area internet traffic patterns and characteristics", IEEE Network, vol.11, n. 6, pp. 10-23, November-December 1997.