

# Planificación de Redes Troncales de Conmutación Óptica Transparente

Ramón Aparicio Pardo, Belén García Manrubia, Pablo Pavón Mariño  
Universidad Politécnica de Cartagena,  
Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones,  
Plaza del Hospital 1, 30202, Cartagena (Murcia)  
Teléfono: 968 33 8871  
E-mail: {ramon.aparicio, belen.garcia, pablo.pavon}@upct.es

**Resumen.** *El continuo crecimiento de Internet está obligando a buscar nuevos medios para proporcionar mayores capacidades de transmisión en las redes de comunicaciones. Las redes troncales de conmutación óptica transparente representan una respuesta factible a corto y medio plazo para lograr este fin. Por tanto, la planificación de estas redes, buscando un diseño que minimice los costes de la red, tanto OPEX como CAPEX, adquiere una especial relevancia. Este artículo pretende hacer una breve exposición de los conceptos básicos de este tipo de planificación. Para concluir se muestra un caso de estudio, donde se compararan las principales metodologías de planificación de redes ópticas transparentes.*

## 1 Redes Troncales de Conmutación Óptica Transparente

El enorme crecimiento experimentado por Internet, junto con la aparición de nuevos servicios y aplicaciones que necesitan más ancho de banda (video bajo demanda, IP-TV,...) están obligando a aumentar la capacidad de las redes troncales de comunicación, que interconectan los grandes centros de tráfico. Las redes troncales se basan en enlaces de fibra óptica, un medio que posee excelentes características como soporte de comunicaciones, tales como un enorme ancho de banda (potencialmente 50 Tbps), una baja atenuación de señal (0,2 dB/km), una baja distorsión de señal, bajos consumos de potencia, ... [1].

Una red de conmutación óptica consiste en un conjunto de nodos de conmutación interconectados por medio de enlaces de fibra óptica. A los enlaces de fibra se les suele llamar *enlaces físicos*, y al grafo de interconexión de los nodos mediante estos, *topología física*. Existe una limitación muy seria al tratar de aprovechar el enorme ancho de banda óptico, pues mientras en una fibra monomodo éste es de casi 50 Tbps, las velocidades de conmutación electrónica en los nodos son como máximo de unos pocos gigabits por segundo [1]. A esto se le llama “cuello de botella electrónico”. Con el objeto de superar este desajuste de capacidades, se utiliza la técnica de *multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM)*. En esta técnica, el ancho de banda proporcionado por la fibra óptica, es dividido en canales de transmisión de menor capacidad, centrados en torno a una longitud de onda (color) de luz laser. Aun así, surge el problema de cómo llevar a cabo la conmutación de la información presente en estos canales de longitud de onda sin procesarla electrónicamente, esto es, de manera

transparente evitando el mencionado “cuello de botella”. Varios paradigmas de conmutación óptica han sido propuestos: conmutación óptica de paquetes (OPS), conmutación óptica de ráfagas (OBS), conmutación óptica de circuitos (OCS)... Pero es esta última técnica, también llamada Encaminamiento de Longitud de Onda (*Wavelength-Routing, WR*), la única para la cual los dispositivos necesarios para implementarla se hallan técnicamente maduros [2].

Los nodos de conmutación de una red *Wavelength-Routed* disponen de equipamiento de conmutación tanto electrónica como óptica. En la Fig. 1 se muestra la arquitectura típica de un nodo de conmutación de estas redes. El núcleo del equipamiento óptico recibe el nombre de *Wavelength Cross Connect (WXC)*, dispositivo capaz de conmutar canales individuales de longitud de onda, simultáneamente, de una fibra de entrada a una fibra de salida de modo transparente en el dominio óptico, esto es, independientemente de parámetros como la modulación de la señal, o la tasa binaria [2]. En cambio, el equipamiento electrónico para el mismo fin requiere convertir la señal a formato electrónico, procesarla en dicho formato y devolverla al dominio óptico. En las redes *Wavelength-Routed*, el tráfico es cursado a través de caminos ópticos establecidos entre los nodos finales de la comunicación. Estos caminos son conocidos como *lightpaths* y en ellos el tráfico es conmutado en los nodos atravesados de manera transparente mediante *WXC*s (camino de datos marcado como 1 en la Fig. 1). Si un flujo de datos entre un par de nodos no puede alcanzar su destino mediante un *lightpath* directo, se hace necesario el uso de al menos dos *lightpaths*. En este caso, los datos serán conmutados electrónicamente a tasas de procesado menor (“cuello de botella electrónico”) en el nodo donde el flujo cambie de *lightpath* (camino de datos marcado como 2 en la Fig. 1). Finalmente, a los *lightpaths* también se les suele llamar *enlaces*

virtuales, y al grafo de interconexión de nodos mediante ellos, *topología virtual*.

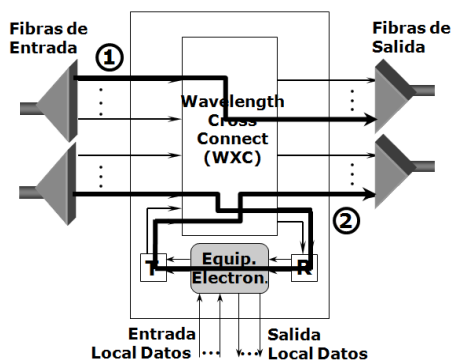


Fig. 1. Arquitectura típica de un nodo de conmutación de una red *Wavelength-Routed*.

## 2 Planificación de redes ópticas transparentes

La planificación de redes de conmutación óptica transparente (*Wavelength-Routed*) supone resolver el llamado problema de diseño de topologías virtuales (*Virtual Topology Design Problem, VTD*). Este problema recibe como entradas la topología física de la red y el tráfico (estimado o conocido) entre los nodos de la red. El problema *VTD* se suele descomponer en cuatro subproblemas [1]: a) selección de la topología virtual, donde los *lightpaths* son definidos en términos de nodos orígenes y destino; b) encaminamiento de los *lightpaths*, donde se determina la secuencia de enlaces físicos atravesados por cada uno; c) asignación de la longitud de onda, donde se decide los canales de longitud de onda ocupados en cada enlace por el *lightpath*; y, d) encaminamiento de los flujos de tráfico sobre la topología virtual, donde se establece para cada flujo de tráfico, la secuencia de *lightpaths* que debe atravesar. Los subproblemas b) y c) suelen ser agrupados bajo la denominación de *Routing and Wavelength Assignment (RWA)* [1]. Resolver conjuntamente estos cuatro subproblemas implica resolver un problema *multicapa*. Existen diferentes variantes de este problema *multicapa* donde se introducen aspectos adicionales.

Los problemas de planificación mencionados pueden ser formulados como un problema de optimización lineal entera-mixta (*Mixed-Integer Linear Programming, MILP*) [1]. En una formulación *MILP*, se buscan los valores de las variables de decisión (variables que representan nuestras decisiones de planificación: encaminamiento de *lightpaths*, encaminamiento de flujos,...) que minimizan o maximizan una determinada función lineal objetivo. Esta función generalmente será una función que modela los costes de la red. El conjunto de los valores (enteros o continuos) que pueden tomar las

variables de decisión estarán limitados por restricciones lineales. Este esquema inicial se modificará en función del tipo de problema. Así, el diseño de redes resistentes a fallos, supondrá un aumento del tamaño del problema, al considerar también los sistemas de respaldo [4]. O la planificación *Physical Layer Impairment Aware RWA (PLIA-RWA)*, introducirá no linealidades en la restricciones de nuestro problema, provenientes de la capa física [5].

Se ha demostrado, que cada uno de los subproblemas a), b) y c) (y por tanto, cualquier otro problema que los contenga), son de clase NP-completa [4]. Esto significa que el tiempo de computación necesario para resolverlos crecen de manera exponencial con el tamaño del problema, volviéndose computacionalmente intratables para redes moderadamente grandes. La formulación *MILP* nos ofrece una técnica de resolución que proporciona soluciones exactas pero inalcanzables para tamaños grandes de red. Esto nos lleva, al empleo de algoritmos de planificación heurísticos para resolver tamaños mayores en márgenes de tiempo razonables. Los heurísticos proporcionan soluciones sub-óptimas. Si estas son suficientemente próximas a las soluciones óptimas, el heurístico es considerado un algoritmo aceptable. El problema es cómo evaluar las bondades de un heurístico. Aquí, tenemos dos alternativas. La primera, es comparar las soluciones del heurístico con las soluciones exactas de una formulación *MILP* para tamaños moderados del problema, donde todavía es posible calcular la solución óptima. Otra alternativa, es calcular analíticamente cotas al valor de la solución óptima del problema (sin conocer este valor óptimo). Si nuestro heurístico proporciona soluciones cercanas a esas cotas, sabemos que son también soluciones cercanas a la solución óptima. Esta técnica puede ser empleada, además, para tamaños grandes del problema. Sin embargo, no siempre es fácil encontrar cotas lo suficientemente ajustadas al óptimo para ser útiles en la evaluación de los heurísticos. Podemos concluir que no existe una única técnica capaz de resolver cualquier problema de planificación, sino que debemos combinar todos los procedimientos anteriores teniendo en cuenta el problema concreto a resolver.

## 3 Un ejemplo de planificación

En esta sección, compararemos un algoritmo heurístico con una formulación *MILP* para resolver el problema clásico *multicapa* presentado en la sección anterior. Con este fin se han llevado a cabo una serie de pruebas empleando la herramienta *MatplanWDM* [5].

Utilizaremos como entradas del problema la topología física de la red de investigación Internet 2 [6], mostrada en la Fig. 2; y la matriz de tráfico simétrica, recogida en la Tabla I. Esta matriz de tráfico ha sido calculada a partir de un modelo de

población-distancia, donde los tráficos entre un par de nodos son mayores cuanto mayor es la población de los nodos, y menores cuanto mayor es la distancia entre los mismos [7]. En la Tabla I, además del tráfico en Gbps entre los nodos, se muestra las distancias en kilómetros entre los mismos.

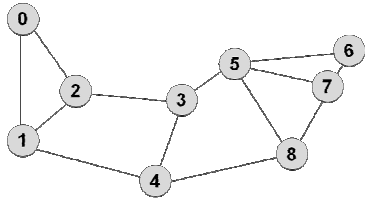


Fig. 2 Topología física Internet2.

TABLA I  
Matriz de tráfico en Gbps de Internet2 (triangular superior) y distancias en Km (triangular inferior)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0		16.1	13.8	8.7	8.5	8.5	7.4	6.2	7.0
1	1342		16.3	10.9	14.2	14.2	16.5	8.9	10.5
2	913	1303		11.7	11.2	10.1	7.5	7.5	8.8
3	-	1330	-		16.0	17.8	12.9	12.2	14.8
4	-	1705	-	818		16.9	16.2	12.4	16.3
5	-	-	-	690	-		29.5	18.6	20.0
6	-	-	-	-	-	1400		30.5	22.2
7	-	-	-	-	-	905	278		17.7
8	-	-	-	-	1385	1045	-	700	

La formulación *MILP* empleada queda definida en detalle en la ayuda de [5]. En cuanto a la función objetivo, se ha pretendido minimizar, en primer lugar, el número total de *lightpaths* necesarios para cursar todo el tráfico, y en segundo lugar, el número de *lightpaths* atravesados por un flujo de datos entre un par de nodos, para lo cual se han utilizado un coste de conmutación electrónica de 1 por cada Gbps conmutado, y un coste por transceptor de 10 por cada Gbps recibido/transmitido ópticamente. En cuanto al algoritmo heurístico empleado [5] intenta minimizar como objetivo principal también el número de *lightpaths* a establecer. El algoritmo consiste en un bucle principal dividido en dos partes. En primer lugar, el algoritmo trata de encaminar todo el tráfico posible empleando la topología existente. En la segunda parte, el objetivo es crear un nuevo *lightpath* entre el par de nodos con el máximo flujo de tráfico posible remanente. Si no es posible, tratará de establecer el *lightpath* entre el par con el segundo mayor flujo de tráfico y así sucesivamente. El bucle finaliza cuando el algoritmo no es capaz de encaminar más cantidad de tráfico y no es posible establecer más *lightpaths*.

Para evaluar el algoritmo heurístico y la formulación *MILP*, se han resuelto varias instancias del problema de planificación variando el tráfico total ofrecido entre los valores {500, 1000, 1500, 2000, 2500} Gbps. Se ha asumido que la capacidad de los canales *WDM* en todas las fibras es de 10 Gbps. También se han calculado analíticamente cotas inferiores al número total de *lightpaths* necesarios. La Tabla II recoge los resultados obtenidos para el número de *lightpaths* y el tiempo de ejecución empleado en cada caso. Observando las columnas relativas al número de *lightpaths*, es claro que la solución *MILP* queda ajustada a las cotas, pues se trata de la solución óptima. Además, vemos que las cotas analíticas constituyen una buena aproximación de las soluciones óptimas. De hecho, a medida que el tráfico ofrecido aumenta, los valores de éstas se acercan progresivamente al valor de las cotas, estando la diferencia entre ambos valores siempre por debajo del 3 % partir de 1000 Gbps. En cuanto al algoritmo, podemos comprobar que sus resultados son algo peores que los obtenidos por el *MILP*. De nuevo, a medida que se aumenta el tráfico ofrecido, la desviación entre el número de *lightpaths* de la solución *MILP* y el obtenido por el algoritmo heurístico, decrece. La mayor desviación es de un 15.25% para 500 Gbps de tráfico, y la menor corresponde a un 3.10% para 2500 Gbps. Si nos centramos en los tiempos de ejecución empleados, cabe destacar la gran diferencia entre la rápida ejecución del algoritmo frente a los tiempos más largos de la formulación. La formulación *MILP* es unas 100 veces más lenta que el heurístico para todos los casos probados. Esto nos da una idea de la lentitud de las formulaciones *MILP* frente a los heurísticos. Por tanto, estos resultados parecen sugerirnos, en primer lugar, que las cotas calculadas constituyen una buena estimación del número mínimo de *lightpaths* necesarios para cursar el tráfico ofrecido, y que esta estimación mejora si aumentamos el valor del tráfico; y en segundo lugar, que el heurístico propuesto genera soluciones sub-óptimas tanto más próximas al valor óptimo como mayor sea la carga de tráfico de la red, y que, además, estas soluciones son generadas en plazos de tiempo dos órdenes de magnitud menores que los empleados por el *MILP*.

TABLA II

Tráfico total ofrecido (Gbps)	Número de <i>lightpaths</i>			Tiempo de ejecución (s)	
	Cota inferior	MILP	Heur.	MILP	Heur.
500	108	118	136	89.21	0.42
1000	208	214	232	109.09	0.59
1500	310	318	332	136.75	0.76
2000	410	416	438	137.89	1.05
2500	506	516	532	176.09	1.20

### 3 Conclusiones

A lo largo de este artículo hemos mostrado los conceptos básicos de la planificación en redes de conmutación óptica transparente. Se ha empezado definiéndolas, centrándonos en desarrollar el paradigma de conmutación *Wavelength Routing*. A continuación hemos explicado los principales problemas de diseño y procedimientos de resolución de los mismos implicados en la planificación de estas redes. Y finalmente, se ha utilizado un caso de estudio sencillo para ejemplificar los conceptos introducidos. En este estudio, hemos comparado las soluciones obtenidas por una formulación *MILP* con las halladas por un algoritmo heurístico, llegando a la conclusión de que el heurístico ofrece un procedimiento para obtener soluciones sub-óptimas suficientemente buenas con tiempos menores de ejecución que el empleado por la formulación *MILP* para hallar las soluciones óptimas. También se ha calculado por procedimientos analíticos unas sencillas cotas a los valores óptimos, y las hemos evaluado frente a las soluciones *MILP*. De esta comparación, hemos comprobado la utilidad de estas cotas como estimadores de los valores óptimos. Como conclusión final, diremos que la planificación de redes ópticas transparentes es un campo de investigación activa en la actualidad, ya que este tipo de redes están en proceso de despliegue, momento en que la planificación de las mismas es la tarea a resolver.

### Agradecimientos

El trabajo descrito en este artículo ha sido realizado con el apoyo de los proyectos *BONE* ("*Building the Future Optical Network in Europe*"), una Red de Excelencia financiada por la Comisión Europea a través del 7º Programa Marco; el proyecto español TEC2007-67966-01/TCM CONPARTE-1; y el proyecto FORMA 00002/CS/08 de la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia; y desarrollado en el marco del "Programa de Ayudas a Grupos de Excelencia de la Región de Murcia, de la Fundación Séneca" (Plan Regional de Ciencia y Tecnología 2007/2010).

### Referencias

- [1] B. Mukherjee, *Optical WDM Networks*, Springer Science+Business Media, Inc.. ISBN: 0-387-29055-9 (2006).
- [2] T. S. El-Bawab, *Optical Switching*, 1ª ed., New York, Springer Science+Business Media, Inc. ISBN: 0-387-26141-9 (2006).
- [3] A.K. Somani, *Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks*, Cambridge University Press. ISBN: 0-521-85388-5 (2008).
- [4] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, A. Mukherjee. "Some Principles for Designing a Wide-Area WDM Optical Network". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 4, No. 5, pp. 684-696, October 1996.
- [5] *MatPlanWDM* disponible en Matlab Central: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13791>
- [6] Internet 2 Global Research Network Operations Center: <http://www.abilene.iu.edu/>
- [7] R.S. Cahn, *Wide Area Network design. Concepts and tools for optimization*, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998.