

Benefits of Elastic Spectrum Allocation in Optical Networks with Dynamic Traffic

M. Recalcati, F. Musumeci, *Member, IEEE*, M. Tornatore, *Senior Member, IEEE*,
S. Bregni, *Senior Member, IEEE* and A. Pattavina, *Senior Member, IEEE*

I. INTRODUCCIÓN

ESTUDIOS recientes [1] confirman un crecimiento con tendencia exponencial del tráfico IP enrutado por redes centrales. Una evolución hacia sistemas de fibra óptica más flexibles y escalables por lo tanto requerida para construir la nueva generación de redes ópticas centrales capaces de soportar dicho continuo crecimiento de tráfico.

Actualmente las redes ópticas desplegadas utilizan sistemas con multiplexado por división de longitud de onda (WDM) operando sobre una rejilla con espacio de canales de 50 o 100 GHz. Esta granularidad en el espectro rígida y gruesa causa ineficiente capacidad de uso. De hecho, en las actuales redes de longitud de onda enrutada, la asignación de completa de las longitudes de onda (también indicado con λ) es necesaria para enrutar una conexión, incluso cuando el ancho de banda requerido es inferior a la capacidad de todo un λ . Por otra parte, con la WDM, las conexiones que requieren un ancho de banda, que es un múltiplo entero de la capacidad de la longitud de onda (p.ej., múltiplo de 100 Gbit/s), no puede ser provisionadas de manera eficiente desde la perspectiva de la ocupación del espectro, como las redes WDM actuales que asumen implícitamente un exceso estimado de las bandas de guarda espectral entre longitudes de onda (ver Sec. II).

Para hacer frente a estos problemas, una fina sub-longitud de onda de la granularidad del espectro puede ser identificada con un espectro óptico, de modo que una serie de *cortes de frecuencia* contiguos (FSs), que tienen un ancho espectral de p.ej. 12.5 GHz, 6.25 GHz o 5 GHz, pueden ser aprovechada para crear canales de ancho de banda personalizado [2]. La serie de contiguos FSs utilizado para servir una única conexión

es típicamente referido como *Spectrum Slot*. Esta técnica proporciona una alta flexibilidad en la asignación del ancho de banda, obtenida por la selección de un número variable de FSs de acuerdo con las necesidades de ancho de banda de la conexión.

La implementación del paradigma EON requiere algunos dispositivos novedosos que permiten, por ejemplo un transpondedor con ancho de banda variable (BV) y conexiones cruzadas, que deben ser capaces de transmitir, recibir y conmutar señales ópticas en múltiples intervalos de FS. Con estas limitaciones, los algoritmos de enrutamiento y longitud de onda (RWA) adaptadas en redes WDM tradicionales ya no son más aplicables a EONs.

De hecho, las conexiones EONs presentan dos limitaciones específicas: contigüidad y continuidad del espectro. *Contigüidad del espectro* significa que, si una cierta conexión necesita ser asignada en dos o más FSs, estos FSs deben ser adyacentes en el espectro óptico. Por otro lado, la *continuidad espectral* significa que una conexión debe ser ocupada por el mismo (conjunto de) FS(s) a lo largo de toda la ruta desde la fuente hasta el nodo de destino. Tenga en cuenta que, mientras la continuidad espectral tiene una limitación correspondiente en el caso WDM (restricción de la continuidad de la longitud de onda), la restricción de la contigüidad del espectro es una característica específica de los escenarios EON. Por lo tanto, en lugar de RWA, un problema más complejo de enrutamiento y asignación del espectro (RSA) debe ser resuelto, siempre que una conexión necesita aprovisionamiento en un EON.

Varia literatura ha abordado los problemas relacionados con la eficiencia, la escalabilidad y la viabilidad del paradigma EON [3]. El concepto de EON fue propuesto por primera vez en [4], donde los autores se refieren al concepto de Spectrum sLICed Elastic en la trayectoria de redes ópticas (SLICE) y la identificación de la Multiplexación por División de Frecuencias Coherente Ortogonales (COOFDM) como una tecnología que permite una mayor flexibilidad en la asignación de recursos espectrales dentro las redes ópticas. En [5], diversas estrategias de tráfico-grooming y un esquema de reserva del espectro fueron propuestos para el aprovisionamiento de conexión dinámica en EONs, pero solo se obtienen los beneficios cuando las exigencias el aprovisionamiento de sub-longitud de onda se mostraron, sin considerar que la provisión de conexiones requiere un mayor ancho de banda que la que proporciona una longitud de onda.

En [6], se propusieron varios algoritmos de aprovisionamiento, que consideran tanto como el enrutamiento de ruta fija y cálculo de trayectos en línea, y los beneficios proporcionados por la adopción de múltiples formatos de modulación para las conexiones de aprovisionamiento también fueron evaluados. En [7], los beneficios de EONs en condiciones de tráfico dinámico fueron evaluados tanto por el consumo de energía

M. Recalcati, Politecnico di Milano, Milano, Italy, none@polimi.it
F. Musumeci, Politecnico di Milano, Milano, Italy, musumeci@elet.polimi.it
M. Tornatore, Politecnico di Milano, Milano, Italy, tornator@elet.polimi.it
S. Bregni, Politecnico di Milano, Milano, Italy, bregni@elet.polimi.it
A. Pattavina, Politecnico di Milano, Milano, Italy, pattavina@elet.polimi.it

como en los puntos de vista del desempeño de bloqueo. En [8], el efecto de usar múltiples formatos de modulación en conexiones dinámicas EON fue estudiado.

En este trabajo, proponemos un algoritmo RSA para EONs, Evaluamos el comportamiento en términos de la probabilidad de bloqueo y la utilización de los recursos de red (p.ej., el espectro global) bajo el tráfico dinámico, comparando EONs con las redes actuales WDM, con y sin la capacidad de grooming. Nuestros resultados muestran cuantitativamente la ventaja de EON en comparación con el tradicional grooming basado en redes WDM.

A diferencia de los trabajos anteriores dirigidos a comparar el comportamiento EONs con el WDM tradicional, en nuestro estudio consideramos formación bajo demanda de súper canales de cualquier tamaño (es decir, no necesariamente como se especifica directamente en la demanda del tráfico de entrada). Creemos que permitiendo mayor flexibilidad en la formación de súper canales puede destacar los mejores beneficios de EON. En este sentido, vamos a utilizar la configuración de ocupación espectral prácticos derivados de la operación actual de la corriente de 100 Gb/s transpondedores.

II. MODELO DE RED ÓPTICA ELÁSTICO

Se supone que el espectro óptico esta dividido en M FSs, indexado de 0 a $(M-1)$ y cada uno ancho T GHz.

La coherencia de los transpondedores actuales PDM-QPSK (Multiplexación por División de Polarización - Modulación por desplazamiento de Fase y Cuadratura) son capaces de transmitir una señal a 100 Gbit/s ocupando aproximadamente 28 GHz en el espectro óptico [9]. Por lo tanto, considerando los sistemas WDM tradicionales con canales espaciados 50 GHz (longitudes de onda), una banda de guarda bilateral de 11 GHz en cada lado se asume implícitamente para el uso de la tecnología actual (ver Fig. 1-a), desperdiciando así recursos espectrales, ya que: i) una banda de guarda mas pequeña que 22 GHz puede ser adoptada; ii) si las señales sobre las longitudes de ondas adyacentes necesitan ser cambiadas/ filtradas juntas, la banda de guarda no es necesaria.

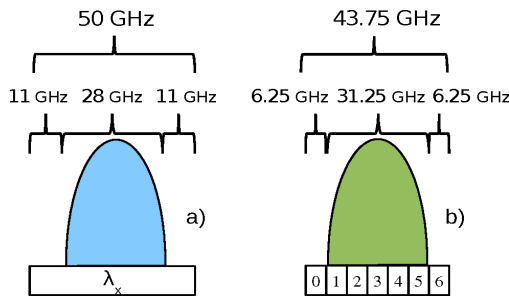


Figura 1. Ocupación del espectro óptico: a) transpondedor tradicional WDM; b) transpondedor BV.

A continuación, se asume que la separación entre canales es el mas fino que se puede adoptar en EON. Recientemente, los organismos de estandarización trabajaron en esta dirección: la separación de 12.5 GHz ha sido adoptado como un primer paso hacia la asignación de ancho de banda elástico [10].

Suponiendo para el caso EON que los transpondedores BV tienen aproximadamente la misma eficiencia espectral como los antes mencionados transpondedores PDM-QPSK, y dado

el ancho de cada FS (p.ej., 6.25GHz), a continuación consideramos que un transpondedor elástico es capaz de transmitir 100 Gbit/s sobre un de 31.25 GHz (p.ej., 5 FSs) (El múltiplo entero mas bajo del numero FSs, donde a 28 GHz que corresponde al espectro ajustado a 5 FSs, p.ej., $5 \cdot 6.25 \text{ GHz} = 31.25 \text{ GHz}$). Por otra parte, se supone que un FS por lado se usa como banda de guarda en EONs, como se muestra en Fig. 1-b).

Bajo estas suposiciones, un transpondedor elástico es capaz de transmitir hasta 20 Gbit/s en un FS (es decir, 6,25 GHz) y sintonizar con flexibilidad su tasa de transmisión con una granularidad igual a un FS (consideramos un reajuste de la tasa de símbolo de los transpondedores manteniendo constante el formato de modulación). Cuando se establece una conexión, un numero de FSs correspondiente al actual al ancho de banda requerido es asignad, y un adicional FS para cada lado es asigna como banda de guarda.

En los EONs, también se proporcionan mayores ahorros cuando se acogen conexiones que requieren una capacidad mayor que la que proporciona un transpondedor (este tipo de conexiones a menudo se conocen como súper canales). Un ejemplo, para configurar una conexión a 200 Gbit/s, in redes WDM actuales, dos longitudes de ondas (es decir, 100 GHz) se necesitan, como se muestra en la Fig. 2-a). Por otro lados, en el contexto EON, dos transpondedores pueden ser sincronizados para transmitir en 10 FSs adyacentes (asumimos que 20 Gbit/s pueden ser transmitidos en una FS y que no es necesaria una banda de guarda si dos señales tienen la misma fuente y el mismo sentido).

Por lo tanto, solo consideramos dos FSs adicionales como bandas de guarda, para un total de 12 FSs en el caso EON. Es decir, un espectro total de 75 GHz es suficiente para transmitir 200 Gbit/s (ver Fig. 2-b). Tenga en cuenta que solamente la banda de guarda *intra-canal* (IG), es mucha mas pequeña que la banda de guarda usada para separar el espectro de diferentes conexiones (GB), que se necesita para permitir un filtrado apropiado (El filtrado de intra-canal es necesario solo en el destino para separa las señales para ser recibidas por diferentes transpondedores. En los nodos intermedios, solo las bandas de guarda entre-canales es necesario para cambiar los diferentes flujos a través OXCs.) de la señales transmitidas por los dos transpondedores elásticos utilizados para una única [11].

La Fig. 2-b) muestra la función de estas bandas de guarda en los EONs. En el ejemplo, GB es usada para conexiones independientes 1 y 2, mientras que un IG mas pequeña es usado para separa dos señales compuestas de super canales asociados a la conexión 1. Como ya mencionamos, asumimos que la banda de guarda GB tiene un ancho espectral igual a un FS. Por otro lado, en nuestro modelo establecimos $IG = I - B$, donde I es el espacio de las sub-portadoras (es decir, el intervalo espectral entre la frecuencia central de dos señales transmitidas por diferentes transpondedores sobre FSs adyacentes, pertenecientes al mismo súper canal) y B es el espectro ocupado por la señal transmitida.

En este estudio, no especificamos el modelo de las bandas de guarda intra-canal IG, pero *todavía atrapamos su importancia por el sobre dimensionamiento del espectro total ocupado por un transpondedor* (consideramos que una señal a 28 GHz proporcionado por un transpondedor elástico ajustado en un espectro de 31.25 GHz).

III. ALGORITMO PROPORCIONADO PARA EON

Describimos ahora el algoritmo propuesto en el trabajo para el abastecimiento de conexiones dinámicas en un escenario EON. Las entradas en el problema RSA son las siguientes.

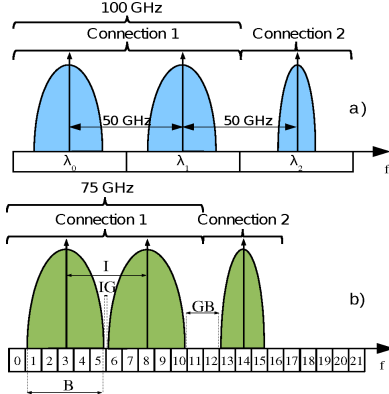


Figura 2. Ejemplo de asignación de súper canales: a) WDM, b) EONs.

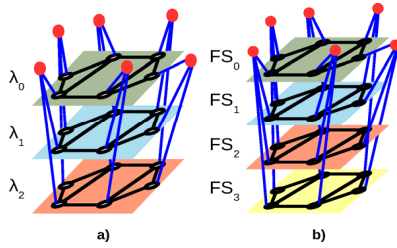


Figura 3. a) El modelo grafico de múltiples capas usando en redes WDM: cada plano corresponde a una longitud de onda. b) El grafico de múltiples capas adaptados en el contexto EON: cada plano corresponde a un FS.

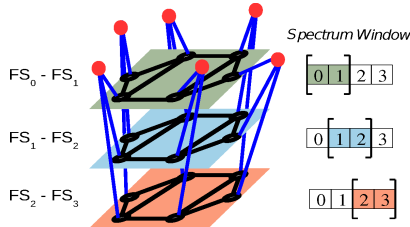


Figura 4. La nueva propuesta del modelo de múltiples capas modificado para EONs. Cada plano representa el estado de ocupación de un conjunto de slots de frecuencias adyacentes.

- $G = (N, E, M)$: representación grafica de la topología física; donde N es el conjunto de nodos, E es el conjunto de enlaces ópticos bidireccionales y M es el número de FSs en cada enlace.
- $c = (s, d, x)$: solicitud de conexión; donde $s, d \in N$ son los nodos fuente y destino, respectivamente, x es el número de FSs requerido para la conexión (excluyendo las bandas de guarda). Para cada solicitud, una conexión *bidireccional* debe ser establecida entre s y d .
- b : número de bandas de guarda ubicadas en cada lado de las señales transmitidas. Así, el número total de FSs necesarias por conexión c es $t = x + 2b$. Siempre asumiremos que $b = 1$.
Así, dado el grafico G y el estado de ocupación actual de la red (es decir, el estado de ocupación en cada FS en cada enlace de la red), para cada conexión entrante c , el aprovisiona-

miento del algoritmo tiene como objetivo la búsqueda del costo mínimo RSA, es sujeto a las dos siguientes limitaciones principales:

- contigüidad del espectro*: todos los FSs asignados para c deben ser adyacentes en el espectro;
- continuidad del espectro*: los mismos FSs deben ser asignados para c en cada enlace en el camino entre los nodos de fuente y destino.

Para cada conexión, si no se encuentra ninguna ruta factible (con suficiente ancho de banda disponible), entonces la conexión es bloqueada, de lo contrario, se enruta y los recursos espectrales se asignan y sucesivamente liberada cuando la conexión termina.

También se definen las siguientes variables básicas:

- w : el camino con costo mínimo calculado para la conexión c ; que consiste en un conjunto de enlaces que conectan los nodos s y d , y el subconjunto $\Phi \subseteq \{0, 1, \dots, M-1\}$ de FSs asignados en w .
- w_c : el costo del camino w .
- i_{FS} : la FS con el índice espectral mas bajo para el camino w .

A. Modelo Gráfico de Múltiples Capas

Un enfoque común usado para ejecutar RWA en redes WDM tradicionales es basado en el llamado Grafico de Múltiples Capas (MLG) [12]. Consiste en replicar la topología de red tantas veces como el número de longitudes de onda por enlace, como se muestra en la Fig. 3-a). Dicho grafico es usado cuando la continuidad de las longitudes de onda deben ser consideradas en el calculo de la ruta fuente-destino, ya que da una idea de las rutas disponibles sobre cada longitud de onda.

Una posible extensión sencilla de este concepto en un escenario EON es el MLG como en la Fig. 3-b), donde cada capa corresponde a un FS. Sin embargo, para atrapar la propiedad de la contigüidad del espectro requerido en el proceso RSA, *un mejor MLG puede ser obtenido, asociando un plano para cada posible conjunto de t adyacente FSs, donde t es el número total de FSs requerida para una conexión requerida, incluyendo bandas de guarda.*

Algoritmo 1 Generación del Grafico Auxiliar

Input: the graph $G = (N, E, M)$; the connection request $c = (s, d, x)$; the number of guard-bands to be used b (thus, $t = x + 2b$ is the total number of FSs, including guard-bands, needed to allocate connection c).

Output: the auxiliary graph aux_graph .

```

aux_graph = 0;
for i = 0 → (M-t) do
    (i is the starting FS corresponding to the i-th layer of aux_graph)
    for all e ∈ E do
        usable = true;
        for j = i → (i + t-1) do
            if frequency slot j is already occupied then
                usable = false;
            end if
        end for
        if usable = true then
            add e to the i-th layer of aux_graph;
            add the edge nodes of e to the i-th layer of aux-graph;
            c(e) = 0;
            for j = i → (i + t-1) do
                c(e) = c(e) + cFS(e, j);
            end for
        end if
    end for
end for
end for

```

Algoritmo 2 Elastic Provisioning Algorithm

Input: the auxiliary MLG aux_graph ; the connection request $c = (s, d, x)$; the number of guard-bands to be used b (thus, $t = x+2b$); the number of shortest paths k to compute for each layer of the MLG.

Output: the minimum-cost path w , its cost w_c and the starting FS, i_{FS} , where to allocate the adjacent FSs for connection c .

```

 $w = \text{NULL}; w_c = \text{UNREACHABLE}; i_{FS} = -1;$ 
Scan the layers of  $aux\_graph$ :
for  $i = 0 \rightarrow (M-t)$  do
  Find the shortest path  $p_i$  between  $s$  and  $d$  for layer  $i$ 
  if  $c_{p_i} < w_c$  then
     $w = p_i;$ 
     $w_c = c_{p_i};$ 
     $i_{FS} = i;$ 
  end if
end for
if  $w_c = \text{UNREACHABLE}$  then
  the connection is dropped;
else
  set-up connection  $c$  allocating  $t$  FSs on  $w$  starting from  $i_{FS}$ ;
end if

```

Un ejemplo del obtenido MLG es mostrado en la Fig. 4 para el caso $t = 2$ (por simplicidad, asumimos que el espectro óptico esta formado por 4 FSs, indexado desde 0 a 3). En general, In general, para una conexión que requiere t FSs con un espectro óptico constituido por M FSs, el MLG será compuesto por $M-(t-1)$ capas. Entonces, cada una de esas capas es examinada para calcular, a través del algoritmo Yen, el camino (y la asignación de espectro) a un costo mínimo en cada capa escaneada.

El pseudo código del algoritmo adoptado para generar el auxiliar MLG es reportado en el Algoritmo 1. Dado el grafico $G = (N, E, M)$, la conexión requerida $c = (s, d, x)$, el numero de bandas de guarda utilizadas en b (entonces, $t = x+2b$ es el numero total de FSs, incluyendo las bandas de guarda necesarias para asignar la conexión c), el algoritmo crea un MLG capa por capa.

Para una capa dada i del MLG, solo los enlaces (y los nodos de borde correspondientes) de G tienen al menos t disponible FSs en el espectro adyacente son incluidos. El grafico auxiliar se ajusta inicialmente igual a un conjunto vacío. Entonces, para cada capa i , es decir, que para cada posible FS para ser asignado (tenga en cuenta que el posibles inicios FSs son aquellos desde FS 0 a FS $M-t$), todos los enlaces $e \in E$ son examinados, comprobando que si al menos t es adyacente a FSs, comenzando desde el i -ésimo FS, están disponibles.

Si todos los FSs desde i hasta $i+t-1$ están disponibles en e , se añade una capa i al of *grafico auxiliar* junto con sus nodos de borde, y el costo de los enlaces e es calculado como la suma de los costos de todos los FSs $i, i+1, \dots, i+t-1$, a través de la función de costo $c_{FS}(e, j)$, lo que da el costo del FS j en los enlaces e . Específicamente, los costos asignados a un inusitado FS es un valor bajo (p.ej., igual a 1), mientras que los costos de los FS ya asignado es igual a ∞ . Entonces, el costo total de los enlaces e es $c(e) = \sum_{j=i}^{i+t-1} c_{FS}(e, j)$.

B. Algoritmo RSA

Para cada conexión al que se dotara, el algoritmo RSA busca el camino de costo mínimo entre los nodos de origen y destino. Si dicho camino existe, los recursos espectrales son asignados y luego se libera cuando la conexión sea derribada.

Para cada conexión entrante, el algoritmo trata de configurar un *nuevo* camino entre la fuente y el destino: p.ej., no realiza traffic grooming para las diferentes conexiones. Nótese que la capacidad de proporcionar grooming al EON implicaría la adopción de una política inteligente para la reservación de recursos (p.ej., FSs), en orden de reducir la fragmentación del espectro, que constituye un problema principal en el contexto de EONs.

El algoritmo RSA se muestra en Algoritmo 2. Después de la inicialización de variables, las $(M-t+1)$ capas del MLG son escaneadas. Para cada capa i , el camino de costo mínimo p_i entre s y d es encontrado y, si su costo c_{p_i} es mas pequeño que el mejor costo de la ruta actual w , entonces el nuevo camino de costo mínimo, su costo y el inicial FS se asignaran, se almacena en w, w_p y i_{FS} , respectivamente. Al final del escaneo del MLG, si no se encuentra el mejor camino (es decir, si w_c no ha sido actualizado hasta un valor finito), la conexión c es bloqueada; además, los recursos son asignados para conexiones *bidireccional*, configurando los costos de FSs desde i_{FS} hasta $(i_{FS}+t-1)$ a largo de w al infinito hasta que la conexión sea derribada.

IV. CASO DE ESTUDIO

El algoritmo propuesto RSA fue probado en una topología NSFNET, que consiste en 14 nodos y 21 enlaces mono-fibra bidireccional, como se muestra en la Fig. 5. Su flexibilidad y desempeño en la asignación de recursos espectrales en EON fueron evaluados.

Consideramos que un espectro de transmisión óptica de 1 THz esta disponible para cada enlace de fibra. Este espectro esta compuesto por 200 FSs, indexado desde 0 a 199. Se asume que cada FS tiene 5 GHz de ancho. Por otra parte, consideramos un transpondedores BV, que son capaces de transmitir a 100 Gbit/s sobre un espectro de 30-GHz (es decir, 6 FSs), de modo que cada sub-portadora (FS) soporta una capacidad de 16.7 Gbit/s. Cada transponedor BV se asume capaz de transmitir a tasas variables, resumido en la Tabla I.

Para evaluar la probabilidad de bloqueo P_b en este escenario, desarrollamos un simulador orientado a eventos, implementando el algoritmo RSA descrito en la Sec. III. Las simulaciones fueron ejecutadas en una estación de trabajo con 3.1-GHz CPU y 8-GB RAM. La simulación ejecuta 10^4 solicitudes de conexión que fueron repetidas hasta que el P_b estimado tenga una confianza estadística de 95% y un intervalo de error de 5%.

En nuestro modelo, la conexiones llegaron como eventos Poisson y tiene una duración distribuida como una función normalizada exponencial negativa a la unidad. Se requirió un ancho de banda variable para que las conexiones puedan ser, ya sea por debajo o por encima de la capacidad de transponedor (solicitudes “sub- λ ” y “super- λ ”, respectivamente). Estos valores de capacidad corresponde a un numero entero de FSs, que son proporcionados por el algoritmo RSA de la Sec. III.

Consideramos dos escenarios de trafico: el ancho de banda requerido por las conexiones pueden ser, ya sean uniformemente distribuidas o no entre todos las permitidas tasas de bits, resumido en la Tabla II. En esta tabla, indicamos las tasas de transmisión “sub- λ ” y “super- λ ” permitidas,

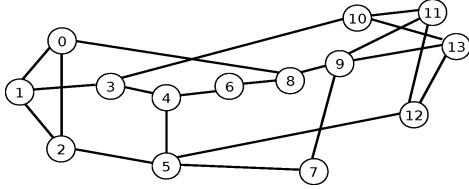


Figura 5. Topología de red NSFNET utilizado en este trabajo.

expresada en Gbit/s y el número de FSs, y el valor de probabilidad correspondiente en los escenarios de tráfico uniforme (P_U) y no uniforme (P_{NU}). En el caso de la distribución de tráfico uniforme, todos los valores de capacidad pueden ser requeridos con una probabilidad igual. Por el contrario, en el caso de distribución de tráfico no uniforme, las solicitudes de tasa de bit más baja son privilegiadas.

Como se muestra en la Sec. V, en el último caso del paradigma EON proporciona mayores ventajas con respecto a la solución WDM tradicional, gracias a su flexibilidad en el aprovisionamiento de los recursos espectrales para las conexiones entrantes.

El desempeño del algoritmo RSA ha sido comparado en tres posibles estrategias de las redes WDM operativas, considerando la misma caracterización de tráfico en el caso EON. Asumimos transpondedores PDM-WPSK de 100 Gbit/s, transmitiendo sobre un espectro de 50 GHz, son desplegados dentro de la red, de este modo 20 longitudes de onda están disponibles sobre un espectro de 1 THz soportados en cada enlace de fibra. Especialmente, consideramos los siguientes escenarios WDM:

- *WDM*: el escenario WDM tradicional, donde cada conexión se aprovisiona estableciendo uno (o más) caminos dedicados. Dependiendo de la tasa de bit permitido en cada conexión (Tab. II) una, dos o tres longitudes de onda pueden ser usadas.

TABLA I. TASA DE GRANULARIDADES DE DATOS PARA LOS TRANSPONEDORES BV.

Number of FSs	Transmission Bandwidth	Subcarrier Capacity
1	5 GHz	16.7 Gbit/s
2	10 GHz	33.3 Gbit/s
3	15 GHz	50.0 Gbit/s
4	20 GHz	66.7 Gbit/s
5	25 GHz	83.3 Gbit/s
6	30 GHz	100.0 Gbit/s

TABLA II. VALORES DISPONIBLES DE ANCHO DE BANDA PARA LAS SOLICITUDES DE CONEXIÓN (EXPRESADOS EN GBIT/S Y NR. DE FSS) Y SUS PROBABILIDADES RELATIVAS EN LOS ESCENARIOS DE TRÁFICO UNIFORME Y NO UNIFORME.

	Bit rate	No. of FSs	P_U	P_{NU}
Sub-wavelength requests	16.7 Gbit/s	1	1/8	8/39
	33.3 Gbit/s	2	1/8	8/39
	50.0 Gbit/s	3	1/8	8/39
	66.7 Gbit/s	4	1/8	4/39
	83.3 Gbit/s	5	1/8	4/39
Super-wavelength requests	100 Gbit/s	6	1/8	4/39
	200 Gbit/s	12	1/8	2/39
	300 Gbit/s	18	1/8	1/39

- *WDM con Single-Hop grooming (WDM-SHG)*: en este es-

cenario, si una conexión c_1 entre dos nodos s y d llega a la red mientras otra conexión c_2 entre los mismos nodos s y d esta todavía activa, la capacidad residual de los caminos usados por c_2 pueden ser utilizados para acomodar c_1 .

- *WDM con Multi-Hop grooming (WDM-MHG)*: en este caso, cuando la conexión c_1 entre dos nodos s y d llega a la red, la capacidad residual de otro camino existente puede ser usados para acomodar c_1 concatenando los caminos entre s y d .

Nótese que debido a las peticiones de tasa de bit permitidos (ver Tab. II), los casos de capacidad de grooming WDM-SHG y WDM-MHG pueden ser aprovechados solo por las solicitudes sub- λ , las conexiones súper- λ requieren *toda* la capacidad de uno (100 Gbit/s), dos (200 Gbit/s) o tres (300 Gbit/s) longitudes de onda.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figs. 6 y 7 muestran los valores de P_b en cuatro escenarios bajo una distribución uniforme y no uniforme. Para ambos casos de tráfico, la probabilidad de bloqueo de EON es significativamente más bajo que WDM, incluso cuando el tráfico grooming es permitido.

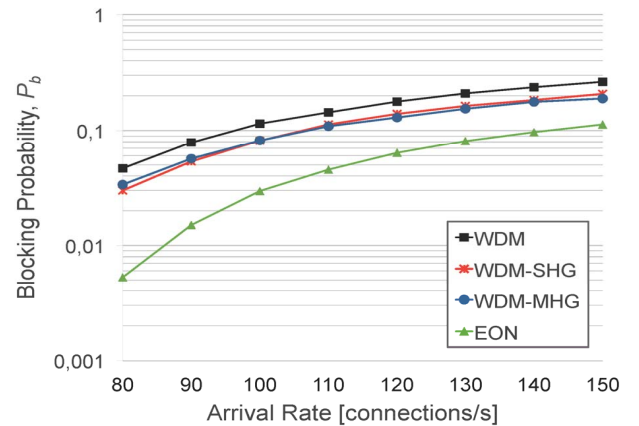


Figura 6. Probabilidad de bloqueo para los diferentes escenarios (tráfico uniforme).

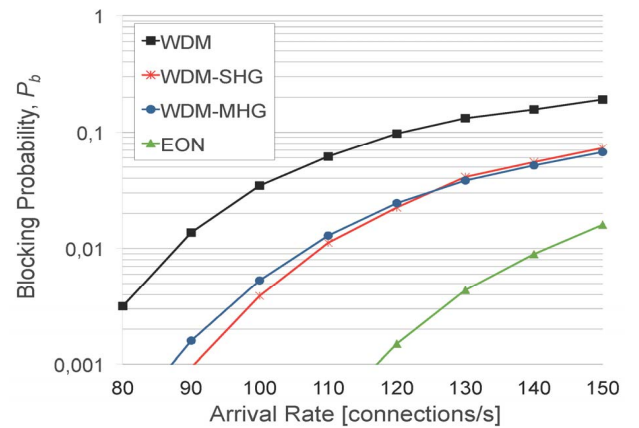


Figura 7. Probabilidad de bloqueo para los diferentes escenarios (tráfico no uniforme).

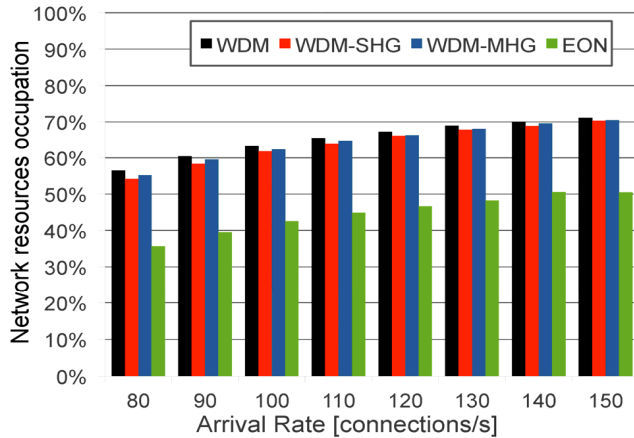


Figura 8. Ocupación de recursos para los diferentes escenarios (trafico uniforme).

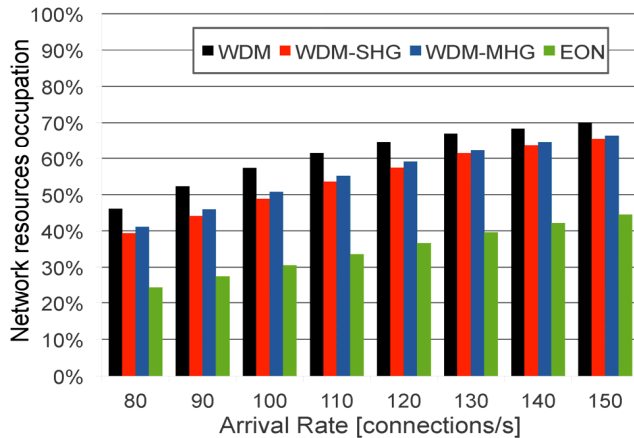


Figura 9. Ocupación de recursos para los diferentes escenarios (trafico no uniforme).

Específicamente, se puede observar que es siempre mas conveniente adoptar la solución EON, en lugar de proporcionar (ya sea single- o multi-hop) capacidad grooming a las redes. De hecho, el enfoque EON, además de una alta flexibilidad en la acomodación de conexiones sobre el espectro disponible, ofrece la ventaja del ahorro de banda de guarda, para las dos solicitudes sub-longitud de onda o súper-longitud de onda.

En el caso EON con trafico uniforme, los valores de P_b son aproximadamente un orden de magnitud inferior a los obtenidos en el caso de WDM con trafico bajo (es decir, hasta 100 conexiones/s), y al menos 50% menor para cargas mas altas (150 conexiones/s).

La ganancia del EON es incluso mas relevante con trafico no uniforme, es decir, cuando las conexiones sub-longitud de onda son privilegiadas. La Fig. 7 muestra que EON supera los escenarios WDM por al menos un orden de magnitud (dos, en el caso de WDM con capacidad no grooming) en todos los casos, ya que para conexión fina dada por las solicitudes de tasa de bit son mas probables. La diferencia en el bloqueo de rendimiento entre EON y WDM (especialmente cuando no grooming es permitido) es mucho mas grande en el escenario no uniforme, ya que cuando una conexión de tasa de bit fina son privilegiados, EONs toma mayor flexibilidad en la asignación

de recursos espectrales.

Las Figs. 8 y 9 muestra una ocupación de recursos espectrales (ya sea usado para transmitir señales ópticas o como bandas de guarda) con distribuciones uniforme o no uniforme. La ocupación de recursos es representada como porcentaje del espectro total disponible en todos los enlaces de la red.

En general, adoptar la asignación de ancho de banda elástico permite gran ahorro del espectro, comparado con todos los casos WDM. En el caso de la distribución de trafico uniforme, al menos el 20% del espectro ahorrado es obtenido en el caso EON con respecto a todos los escenarios WDM. La diferencia en la ocupación de recursos observados entre los diferentes escenarios WDM no es evidente debido al bajo impacto proporcionado por la capacidad de traffic grooming, que no son relevantes cuando las conexiones de altas tasas de bit son frecuentes.

Por otro lado, la distribución de trafico no uniforme, es decir, cuando las conexiones finas de tasa de bit son privilegiados, alto ahorro del espectro (hasta 25%) son obtenidos en EON comparado con las redes WDM. Esto es debido a la alta flexibilidad en EON en el alojamiento de conexiones finas de tasa de bits, que son la mayoría de las llegadas de conexión cuando se considera el trafico no uniforme.

Además, observamos que permite traffic grooming en redes WDM proporcionando una alta ventaja en el escenario de trafico no uniforme, debido a al gran desperdicio de espectro en el caso de WDM tradicional en la asignación de conexiones finas de tasa de bits.

Por último, observamos también que, en ambos escenarios de tráfico uniformes y no uniformes, la ocupación de recursos cuando haciendo multihop grooming es mayor que en el caso single-hop grooming. Esto es debido al hecho de que cuando se lleva a cabo multi-hop grooming, las conexiones pueden tender a aprovechar caminos más largos, por lo tanto, finalmente, que ocupa innecesariamente más recursos.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo, hemos comparado el comportamiento de EONs en comparación con las redes WDM tradicionales, con y sin grooming, bajo condiciones de trafico dinámico. Hemos propuesto un algoritmos para realizar RSA para conexiones de llegadas aleatorias en un escenario EON. Se comparó el comportamiento de los dos paradigmas en términos de la probabilidad de bloqueo y la ocupación de recursos de la red.

Hemos demostrado que la probabilidad de bloqueo de EON pueden ser varios ordenes de magnitud mas bajos que en redes WDM utilizando valores prácticos de ocupación espectral derivado de los transpondedores actuales 100 Gb/s. Por otra parte, hasta un 25% de ahorro se puede obtener en el espectro en EONs, especialmente, si las conexiones finas de tasa de bit son privilegiados.

Las ventajas de el paradigma EON sobre WDM son proporcionados por la mayor flexibilidad de las soluciones en la asignación de ancho de banda como es requerido en las conexiones y mediante el uso de menor cantidad de espectro en las bandas de guarda, especialmente cuando con el aprovisionamiento de las conexiones de los súper canales..

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente apoyado por EU FP7 IRSES MobileCloud Project (Grant No. 612212).

REFERENCIAS

- [1] A. A. M. Saleh and J. M. Simmons, "Technology and Architecture to Enable the Explosive Growth of the Internet", *IEEE Commun. Magazine*, vol. 49, no. 1, pp. 126–132, Jan. 2011.
- [2] G. Shen and Q. Yang, "From Coarse Grid to Mini-Grid to Gridless: How Much Can Gridless Help Contentionless?" in *Proc. of OFC 2011*, Los Angeles, USA, Mar. 2011, pp. 1–3.
- [3] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, E. A. Varvarigos, "Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks", *IEEE/OSA J. of Lightwave Techn.*, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366, 2011.
- [4] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits and Enabling Technologies", *IEEE Commun. Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, Nov. 2009.
- [5] S. Zhang, C. Martel, and B. Mukherjee, "Dynamic Traffic Grooming in Elastic Optical Networks", *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 4–12, Jan. 2013.
- [6] Z. Zhu, W. Lu, L. Zhang, and N. Ansari, "Dynamic Service Provisioning in Elastic Optical Networks With Hybrid Single-/Multi-Path Routing", *IEEE/OSA J. of Lightwave Techn.*, vol. 31, no. 1, pp. 15–22, Jan. 2013.
- [7] J. Vizcaino, Y. Ye, and I. Monroy, "Energy efficiency analysis for dynamic routing in optical transport networks", in *Proc. of ICC 2012*, June 2012, pp. 3009–3014.
- [8] C. Politi, V. Anagnostopoulos, C. Matrakidis, and A. Stavdas, "Routing in dynamic future flexi-grid optical networks", in *Proc. of ONDM 2012*, Apr. 2012, pp. 1–4.
- [9] M. Birk et al. "Real-Time Single-Carrier Coherent 100 Gb/s PM-QPSK Field Trial", *IEEE/OSA J. of Lightwave Techn.*, vol. 29, no. 4, pp. 417–425, Feb. 2011.
- [10] "ITU-T Rec. G.694.1," Feb. 2012.
- [11] G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PMBPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers", *IEEE/OSA J. of Lightwave Techn.*, vol. 29, no. 1, pp. 53–61, Jan. 2011.
- [12] C. Chen and S. Banerjee, "A New Model for Optimal Routing and Wavelength Assignment in Wavelength Division Multiplexed Optical Networks", in *Proc. of INFOCOM 1996*, vol. 1, San Francisco, USA, Mar. 1996, pp. 164–171.