

On the Energy Efficiency of IP-over-WDM Networks

S. Bregni, *Senior Member, IEEE*, V. Grković, F. Musumeci, *Student Member, IEEE*,
M. Tornatore, *Member, IEEE* and F. Vismara

Abstract— In the next years, the Internet will undergo a substantial increase of the capacity required by end-users. Since Internet currently consumes a significant fraction of the world electrical power, reducing the energy consumption of telecom networks is expected to become more and more important. In this paper, we focus on backbone transport networks. We compare three different architectures for IP packet transport based on Wavelength Division Multiplexing (WDM) over optical fiber links (IP-over-WDM networks), namely IP with no Bypass (IP-NB), IP with Bypass (IP-B) and IP with Bypass and Grooming (IP-BG), which differ in their capability of traffic aggregation (grooming) and optical switching. IP-NB performs grooming in every network node, where the traffic is electronically processed and forwarded by the IP routers. IP-B enables switching of wavelength channels directly in the optical domain, thus bypassing the IP packet processing in intermediate IP routers. The IP-BG architecture represents an intermediate solution between the previous two: it provides both grooming capabilities (as IP-NB), in order to exploit network capacity efficiently, and optical switching (as IP-B) to reduce expensive electronic processing. We compare these three solutions, showing the trade-off between the reduction of the power consumption or of the network cost, and we analyze how minimizing one of these two factors can influence the other.

Keywords— Green communications, Internet, optical networks, wavelength division multiplexing.

I. INTRODUCCIÓN

EL CRECIMIENTO del ancho de banda que el Internet afrontará en el futuro cercano, representa un tema desafiante desde el punto de vista del consumo de potencia. Hoy en día, el 7-8% del consumo energético mundial es consumido por la ICT [1] y para ser más específicos, la Internet es responsable de alrededor del 25% de esta cantidad. Por otra parte, se estima que durante los siguientes 10 a 15 años, el requerimiento de tráfico de ancho de banda será de hasta 50 veces más alto que el actual. Esto es principalmente debido a la evolución de la Internet hacia una red de servicios para usuarios móviles o de hogares, donde la mayoría del tráfico consiste en flujos de video de alta velocidad. En este caso, es bastante intuitivo pensar que el requisito de potencia será la principal limitación para las redes de generaciones futuras.

Nosotros nos centramos en redes ópticas para el transporte de tráfico en el *backbone*, y consideramos la reducción de su consumo de potencia, así como también de su costo, esto es posible gracias a las nuevas tecnologías de redes ópticas. Concretamente, las redes ópticas que emplean la técnica de Multi-

plexación por División de Longitudes de Onda (WDM) son idóneas para enrutar canales de longitud de onda (es decir, caminos de luz, o bien, *lightpaths*), cada uno de ellos lleva una (o más) señales óptica(s), desde los nodos origen a los nodos destino, a través de una serie de enlaces de fibra óptica, y en muchos casos, sin necesidad de procesar los datos, en otras palabras, se tiene una reducción de las conversiones Ópticas/Electrónicas/ Ópticas (O/E/O) de la señal (las cuales tienen un alto consumo de potencia debido a los dispositivos optoelectrónicos y a la necesidad del procesamiento electrónico). En las redes IP-sobre-WDM (IPoWDM, del inglés, *IP-over-WDM*), una topología virtual (lógica) de circuitos ópticos portadores de tráfico IP es establecida sobre una topología física compuesta por enlaces WDM, estos circuitos ópticos son mantenidos en el dominio óptico, por ejemplo, desde un puerto del router IP de origen hasta el puerto del router IP de destino.

Las arquitecturas IPoWDM pueden tener diferentes implementaciones: un posible enfoque consiste en circuitos ópticos finalizados en cada nodo, de este modo, solo se usa la tecnología óptica para la transmisión de la señal sobre enlaces WDM (IP sin Bypass [2] o IP-NB). Esta técnica permite la agregación de tráfico desde múltiples orígenes dentro del mismo canal óptico (grooming) y la separación del canal óptico de tráfico en diferentes destinos (degrooming), no obstante, esto conlleva a operaciones costosas con requisitos de energía, tales como conversiones O/E y E/O, y procesamiento electrónico.

Una solución alternativa consiste en interconectar todos los routers IP en la red mediante circuitos ópticos directos (arquitectura IP con Bypass [2] o IP-B). Sin embargo, esta propuesta no es eficiente desde el punto de vista de la capacidad de la red, ya que cada solicitud de conexión, aun si requiere un mínimo ancho de banda, debe usar una longitud de onda dedicada λ (es decir, todo el canal de la longitud de onda).

La arquitectura IP con Bypass y Agregación (*IP with Bypass and Grooming*; IP-BG) representa un compromiso entre las dos soluciones anteriormente nombradas: cada nodo intermedio (es decir, un nodo distinto de la pareja origen/destino de esa solicitud) que es atravesado por el *lightpath* de la solicitud de conexión, puede ser evitado (*bypass*) a nivel de procesamiento electrónico y conmutarse directamente en el dominio óptico. O bien, el nodo intermedio puede realizar agregación de otras solicitudes mediante un procesamiento electrónico hecho en el nivel IP, aprovechando la capacidad del ancho de banda eficientemente.

Ya que hoy en día, la mayoría de las demandas de tráfico requieren más baja tasa de bits que aquellas suministradas por todo el canal de longitud de onda, es natural pensar en una forma de empaquetar las demandas de tráfico eficientemente en el gran ancho de banda de los canales de longitudes de onda. La estrategia comúnmente adoptada para resolver el problema de llevar varias demandas de tráfico a baja tasa de bits

Los autores agradecen al Ingeniero Luis Hernández, Bogotá, Colombia, por traducir cuidadosamente al español el texto original.

S. Bregni, Politecnico di Milano, Milán, Italia, bregni@elet.polimi.it

V. Grković, Politecnico di Milano, Milán, Italia, bregni@elet.polimi.it

F. Musumeci, Politecnico di Milano, Milán, Italia, finusumeci@elet.polimi.it

M. Tornatore, Politecnico di Milano, Milán, Italia, tornator@elet.polimi.it

F. Vismara, Politecnico di Milano, Milán, Italia, bregni@elet.polimi.it

en una sola longitud de onda es realizando agregación de tráfico (*Traffic Grooming*): esto permite transportar las demandas en la misma longitud de onda, sin importar que sus parejas de nodos origen/destino no sean los mismos.

En recientes trabajos, se han investigado el impacto que tiene la agregación de tráfico sobre la eficiencia de energía de la capa de transporte de las redes ópticas. En [2], los autores aprovechan el concepto de “*bypass*” del *lightpath* para diseñar una red *IPoWDM* que minimice el consumo de potencia, reduciendo el número de puertos necesarios en el *router* IP. La propuesta desarrollada en [3] modela el consumo de potencia de un solo *lightpath*; así, el consumo total de potencia de toda la red puede ser obtenido en función del número de *lightpaths* establecidos, que depende estrictamente de cómo es hecha la agregación de tráfico. En [4], dos enfoques son considerados para formular el consumo de potencia de la red de acuerdo al hecho que: i) el consumo de potencia es considerado aproximadamente como una función lineal de la carga de tráfico, o bien, ii) el impacto de la carga de tráfico sobre el consumo de potencia de la red es despreciable. Los nodos modulares que consisten en dos secciones principales (fotónicos y electrónicos) han sido considerados en [5] para realizar agregación de tráfico dinámico con una especial cuidado en el uso de energía y así tener un ahorro energético substancial en las operaciones de red. La agregación de tráfico es también considerada en [6] para reducir el *overhead* operacional y permitir que el consumo de potencia sea proporcional al ancho de banda requerido.

En este artículo, por primera vez según nuestro conocimiento, se consideran tres diferentes arquitecturas *IPoWDM* y se exploran las soluciones de compromiso entre consumo de potencia y costo, en las arquitecturas ya mencionadas. En la sección de resultados, se ilustra numéricamente como minimizan uno de estos dos factores se puede influenciar al otro.

El resto del artículo es organizado en el siguiente modo: en la sección II, se analizan todos los componentes de la red que contribuyen al consumo total de potencia, y se clasifican las correspondientes contribuciones. Además, se muestran los costos normalizados relacionados con los componentes de red considerados. En la sección III, las tres arquitecturas de transporte son descritas con más detalle. La sección IV presenta los resultados de simulación, los cuales minimizan el consumo total de potencia de la red de las tres arquitecturas, así como también, los resultados obtenidos minimizando el costo de la red. Finalmente, se concluye el artículo con la sección V, donde se resumen nuestros resultados.

II. CLASIFICACIÓN DE LAS CONTRIBUCIONES DE POTENCIA Y COSTO EN LAS REDES IP-SOBRE-WDM

A. Contribuciones de Potencia

Varios componentes pueden influenciar en la potencia total consumida en el nivel de transporte de una red *IPoWDM*, por ejemplo:

- dispositivos de conmutación (ya sea de tipo electrónico u óptico);
- dispositivos para la transmisión y recepción de la señal óptica, que genéricamente nos referiremos a ellos como *transponders* (considerados aquí como los puertos de *router* IP, es decir, tarjetas de transmisión y recepción);
- bombeo de amplificadores ópticos (usualmente, Amplifica-

dores de Fibra Dopada con Erblio, o EDFAs);

- señalización de red.

Sin embargo, en una primera aproximación, alguna de estas contribuciones pueden ser consideradas constantes en las tres arquitecturas analizadas, es decir, son las mismas en todos los modelos: por ejemplo, la contribución de potencia relacionada a las operaciones de señalización hechas por el plano de control pueden ser asumidas constantes (iguales a alrededor 150W para una red genérica de transporte [7]). Por otra parte, ya que el tráfico ofrecido debe ser procesado en los *routers* IP de origen y destino, independientemente de la arquitectura de transporte considerada, esta contribución también requiere un consumo de potencia fijo y solo el procesamiento de paquete realizado en los nodos intermedios será tenido en cuenta.

Finalmente, cada EDFA necesita una potencia de bombeo para la amplificación de todas las señales ópticas llevadas por las diferentes longitudes de onda (esto requiere alrededor de 4.5W por cada amplificador en cada fibra de acuerdo con [2]). Nosotros optamos por un modelo en el cual los EDFAs son dados y están ya ubicados cada 80 km [2], por lo tanto, la contribución total debido a los EDFAs pueden ser también considerada un valor constante para todas las arquitecturas de red. En conclusión, las contribuciones variables restantes del consumo total de potencia pueden ser agrupadas en las siguientes tres categorías.

- 1) *Transponders*. Cada puerto del *router* origen es equipado con un *transponder*, para convertir la señal electrónica en una señal óptica y transmitirla sobre una de las longitudes de onda disponibles; por otro parte, cada puerto del *router* destino necesita un *transponder* para recibir la señal y reconvertirla al dominio electrónico. Además una pareja de *transponders* (receptor y transmisor) es también necesaria en nodos intermedios en el caso que la agregación/extracción de tráfico sea realizada.
 - 2) *Procesamiento electrónico*. Esta notable contribución al consumo de potencia se eleva cuando el procesamiento electrónico es realizado en nodos intermedios, típicamente para cumplir con la agregación y extracción de la demanda de tráfico concerniente a diferentes parejas origen/destino. Se estima [8] que el consumo de potencia de una *router* IP (usado, por ejemplo, para la agregación) es del orden de 17.5W por Gbit/s del tráfico procesado.
 - 3) *Conmutación Óptica*. La conmutación óptica puede ser realizada directamente en el dominio óptico por parte de las estructuras de conmutación óptica. Tales dispositivos son basados en espejos MEMS (Sistemas Micro Electrónico-Mecánicos) y los cuales serán considerados. Cuando un espejo de una conmutador óptico 2D basado en MEMS se acciona (esto es, en el momento que el canal de longitud de onda es conmutado), una potencia del orden de 11.5W es requerida [9].
- Todas las contribuciones debidas a los *transponders*, procesamiento electrónico y conmutación óptica serán representadas con P_{tr} , P_e y P_o , respectivamente. En la Tabla I, las contribuciones de potencia son resumidas.

TABLA I:
CONTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA Y COSTOS NORMALIZADOS.

	Potencia requerida	Costo normalizado
Transponder a 10 Gbit/s	35 W	2
Procesamiento Electrónico	17.5 W por Gbit/s	0.2 por Gbit/s
Conmutación Óptica	11.5 mW por lightpath	0.05 por lightpath

B. Contribuciones de Costo

Del mismo modo que en el análisis previo de consumo de potencia, se consideran las mismas tres contribuciones (cada una de ellas corresponde a una contribución en potencia) para la comparación de costos. Todos los costos son normalizados a un valor unitario, por lo tanto, se compara las tres arquitecturas en términos de costos totales normalizados. En [10] es presentado un conjunto de valores realísticos de costos sin ninguna referencia específica de los productos de algún vendedor. Específicamente, los tres costos de componentes son los siguientes.

- 1) *Transponders*. Transponders de largo recorrido (Long-Haul) a 10 Gbit/s son considerados en este artículo y se asumen que tienen un costo normalizado igual a 2.
- 2) *Procesamiento electrónico*. Los puertos de los routers IP, incluido la conmutación electrónica y las funcionalidades de procesamiento de paquete/encabezado realizadas en nodos intermedios, se consideraran con un costo de 0.2 por Gbit/s del tráfico tratado.
- 3) *Conmutación Óptica*. Una operación de conmutación de un solo lightpath a 10 Gbit/s realizada por un dispositivo basado en MEMS, es realizando con costo normalizado de 0.05. En la Tabla I, las contribuciones de costo son resumidas.

III. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE RED

En esta sección, las tres arquitecturas IP-sobre-WDM son comparadas. Las diferencias entre estos modelos se concentran principalmente en la manera como se realizan las operaciones de agregación y conmutación. Por lo tanto, los requisitos de potencia y los correspondientes costos que serán tenidos en cuenta, varían de acuerdo a la tecnología considerada. Nuestros resultados han sido obtenidos utilizando formulaciones de Programación Lineal Entera (*Integer Linear Programming; ILP*), las cuales tienen como objetivo minimizar el consumo total de potencia de la red en el primer caso, y el costo de la red en el segundo caso. Las características de los tres modelos pueden ser resumidas en el siguiente modo:

- *IP-NB*. En este caso, la conmutación y la agregación son efectuados en el dominio electrónico: en cada nodo de la red, como se muestra en la Fig. 1, la señal óptica es convertida al dominio electrónico mediante un transponder. Luego, es procesado por un router IP, el cual lo envía hacia el siguiente nodo de la red y, si es necesario, agrega esta señal junto con diferentes señales ópticas en la misma longitud de onda. Finalmente, es reconvertida al dominio óptico a través de un transponder. Así, en este caso, no hay contribución de potencia por parte de la conmutación óptica. El modelo ILP usado por esta arquitectura consiste en una formulación basada en un flujo de múltiples mercancías (*Multicommodity*) [11], donde se modela una topología de una sola capa por resolver *el problema de enrutamiento*. Esta formulación esta solamente sujeta a la restricción de ca-

pacidad, es decir, cada enlace conectado a dos nodos distintos puede transportar una cantidad limitada de tráfico de acuerdo a una capacidad establecida, y de acuerdo a la restricción de conservación de flujo, es decir, todos los tráficos que ingresan en cada nodo de la red deben ser enviados por el nodo (si este representa un nodo intermedio para una específica solicitud) o terminados en él (en caso que sea un nodo destino de la solicitud).

- *IP-B*. Como es representado en la Fig. 2, en cada nodo, un router (capa IP), está instalado sobre un conmutador basado en MEMS (capa óptica de transporte). En este caso, la conmutación es efectuada en el dominio óptico, mientras que la agregación puede ser hecho para las mismas parejas origen/destino: así, el número de transponders necesarios depende estrictamente del número de solicitudes y sus anchos de banda (en otras palabras, del número de lightpaths). El ILP que se considera en este caso es un problema de Enrutamiento y Asignación de Longitudes de onda (*Routing and Wavelength Assignment; RWA*) basado en una sola capa [12], en el cual se necesita considerar la denominada restricción de continuidad- λ (continuidad de longitud de onda), además de las restricciones ya descritas para la arquitectura IP-NB. Ya que cada solicitud de conexión usa todo un (o más) lightpath(s), se debe asignar a esta, una (o un conjunto de) longitud(es) de onda. Por otro lado, se asume que los conmutadores ópticos no tienen capacidad de conversión de longitud de onda, por consiguiente, cada *lightpath* debe ser asociado a la misma longitud de onda en todos los enlaces de red que atraviesa.
- *IP-BG*. Esta es una arquitectura intermedia entre IP-B e IP-NB. La agregación, la conversión O/E/O y por lo tanto, el procesamiento electrónico, son efectuados solo donde sea necesario. Las contribuciones de potencia consideradas aquí, como se muestra en la Fig. 3, son debidas al procesamiento electrónico hecho en cada nodo intermedio (donde, la agregación es hecha como en IP-NB), a la conmutación óptica (en nodos intermedios donde el *bypass* óptico es implementado, como en el caso IP-B) y a los transponders. El ILP considerado para esta arquitectura consiste en una formulación de flujo de doble capa (lógica+física), donde la topología lógica (el conjunto de lightpath establecidos) es mapeada sobre la topología física (el conjunto de enlaces físicos). Cada lightpath es enrutado a través del conjunto de enlaces físicos y es sujeto a la restricción de continuidad- λ ya descrita. Además, las restricciones de conservación de flujo y de capacidad deben ser mantenidas. Las figuras 1, 2 y 3 muestran las contribuciones de potencia, que deben ser tenidas en cuenta en los tres casos por el enrutamiento de las tres solicitudes de conexión, caracterizadas por un tráfico de ancho de banda a baja tasa de bits, mientras que, las principales características de los modelos ILP que se han usado en las tres arquitecturas son resumidas en la Tabla II.

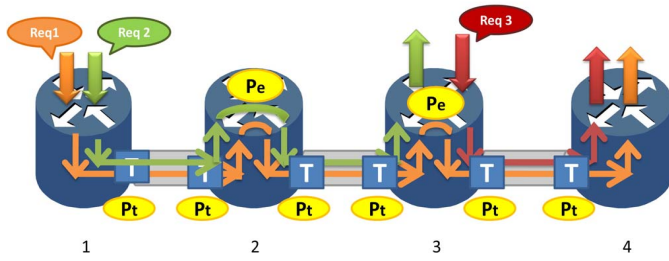


Figura 1. Arquitectura de red *IP-NB*: Dos solicitudes (Req1 y Req2) son agregadas y transportadas por el mismo lightpath entre los nodos 1 y 2, donde todo el tráfico es procesado por el router IP, y entre 2 y 3, donde este último es el nodo destino de Req2. El nodo 3 agrega Req1 y Req3, las cuales son enviadas al nodo destino 4.

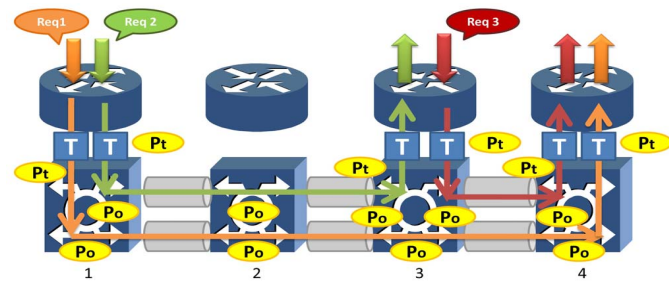


Figura 2. Arquitectura de red *IP-B*: Cada solicitud usa toda una λ (dos λ s son necesarias) y su tráfico es procesado solamente en la capa IP en los nodos origen y destino, mientras que en los nodos intermedios, los lightpaths son ópticamente conmutados por estructuras de conmutación basadas en MEMS.

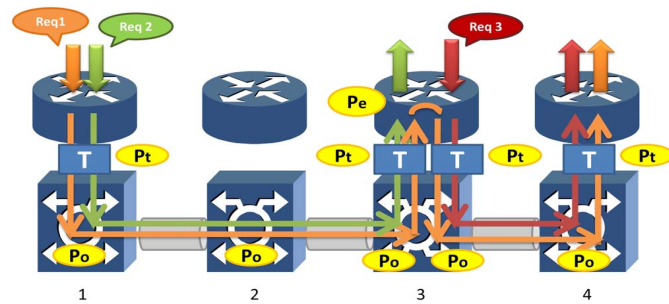


Figura 3. Arquitectura de red *IP-BG*: las solicitudes pueden ser agregadas juntas (solo una λ es necesaria), y el tráfico es procesado electrónicamente solo cuando es necesario: el router IP del nodo 2 es ópticamente atravesado (*bypass*) y en el nodo 3, la Req1 es procesada para poder ser separada de la Req2 e agregada con Req3.

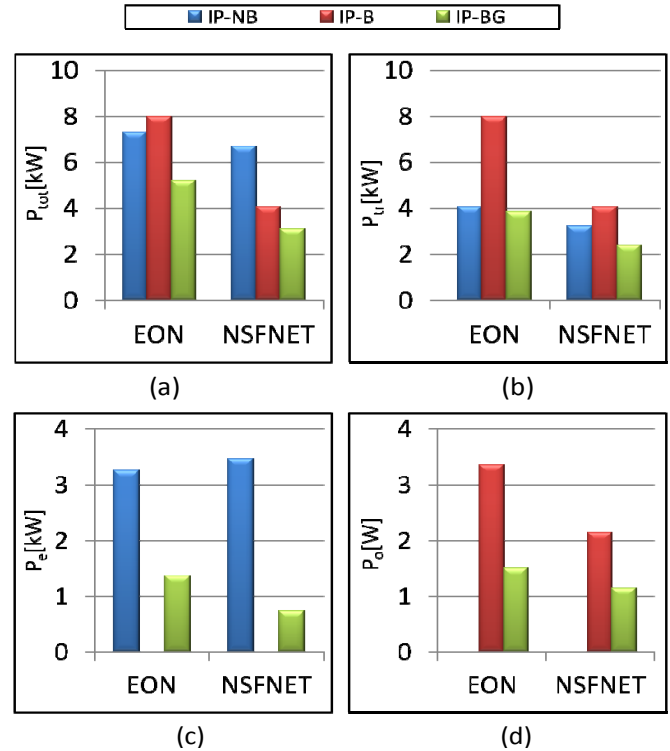


Figura 4. (a) Consumo Total de Potencia y contribuciones individuales para las tres arquitecturas, (b) P_{tr} , (c) P_e y (d) P_o .

TABLA II: MODELOS ILP PARA LAS TRES ARQUITECTURAS.

	IP-NB	IP-B	IP-BG
Modelo ILP	Formulación de flujo de una sola capa	Formulación RWA de una sola capa basada en [2]	Formulación de flujo de doble capa basada en [13]
Conmutación	Electrónica (E)	Óptica (O)	Mixta (E y O)
Grooming	Realizado	No realizado	Realizado
Objetivo	Minimizar $P_{tot} = P_{tr} + P_e$	Minimizar $P_{tot} = P_{tr} + P_o$	Minimizar $P_{tot} = P_{tr} + P_e + P_o$
Restricciones	Conservación de flujo y restricción de capacidad	Conservación de flujo, restricción de capacidad, restricción de continuidad- λ	Conservación de flujo, restricción de capacidad, restricción de continuidad- λ

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección, se muestran algunos resultados numéricos que evalúan el consumo total de potencia y el costo para las tres arquitecturas de transporte anteriormente nombradas. Dos topologías diferentes de red han sido consideradas. En el primer caso, una matriz de tráfico con una cantidad total de tráfico de 350 Gbit/s ha sido mapeada sobre una topología de red con núcleo EON, la cual tiene 11 nodos y 26 enlaces bidireccionales (red COST239 en [14]). En el segundo caso, una matriz de tráfico no uniforme caracterizada por una cantidad total de tráfico igual a 180 Gbit/s ha sido mapeada sobre una topología de red NSFNET que consiste en 15 nodos y 22 enlaces bidireccionales [2].

A. Minimización del Consumo de Potencia

La Fig. 4 muestra los resultados de simulación optimizados

con respecto al consumo de potencia, obtenidos a partir de los modelos ILP mencionados en la Tabla II. En particular la Fig. 4(a) muestra el consumo total de potencia de las tres arquitecturas de red, mientras que las Fig. 4(b), (c) y (d) muestran las diferentes contribuciones de potencia (P_{tr} , P_e y P_o). Se puede observar inmediatamente que tanto en el caso EON como en NSFNET, la arquitectura IP-BG resulta con el más bajo consumo de potencia, típicamente al menos 30% más bajo que el caso IP-NB y arriba del 25% más bajo que el caso IP-B. Como se puede ver de las Fig. 4(b) y (c), esto es debido a la reducción lograda por IP-BG en el número de transponders (comparado con IP-NB y IP-B) y del procesamiento electrónico (comparado con IP-NB, ya que IP-B no tiene P_e).

Es importante resaltar que en el caso NSFNET, la arquitectura IP-NB tiene el consumo más alto de potencia (principalmente debido a la alta potencia que genera el procesamiento electrónico), mientras que en el caso EON, la arquitectura IP-B es la de menor eficiencia energética (principalmente por el elevado número de transponders). Estos comportamientos derivan de la diferencia entre las dos topologías de red y del tráfico total ofrecido, que se considera en los dos casos.

De hecho, la topología EON es considerablemente más enmallada (*mesh topology*) ya que contiene más enlaces entre nodos que la NSFNET, además, está también caracterizada por tener un cantidad promedio de saltos (*hop*) por conexión mucho más bajo: de ahí se deduce que la cantidad de procesamiento electrónico en los nodos intermedios para el caso IP-NB es relativamente mucho más bajo en el EON que en el NSFNET. La cantidad promedio de enlaces por nodo es 4.7 para el EON y 3 para el NSFNET, mientras que, la cantidad promedio de enlaces atravesados o saltos del camino más corto es 1.56 para EON y del 2.12 para NSFNET.

Además, la alta cantidad de tráfico considerado para el caso EON (350 Gbit/s de tráfico, contra los 180 Gbit/s para el NSFNET) tiende a generar una ineficiencia mucho mayor en la arquitectura IP-B comparada con las otras dos, ya que el número de transponders necesarios en IP-B (lo cual da la principal contribución a la potencia total consumida en esta arquitectura) está estrictamente relacionado con el ancho de banda de la solicitud de tráfico (mientras que, es prácticamente *independiente* a la topología de red). Por lo tanto, dada una cierta matriz de tráfico y cambiando la topología de la red (por ejemplo, algunos enlaces entre sus nodos), se pueden lograr algunos beneficios solo para el caso IP-NB (y obviamente también para la IP-BG). Finalmente, como se esperaba y se puede observar en la Fig. 4(d), la contribución de potencia de la conmutación óptica es la más baja entre las tres contribuciones. Nótese que P_o es del orden de Watts, mientras que P_{tr} y P_e son del orden de kW.

Para ambas topologías, el mismo análisis fue llevado a cabo considerando una matriz de tráfico donde, el ancho de banda de cada demanda de tráfico ha sido escalizada por un factor de 2, 3, 4,5 y 10, respectivamente. En la Fig. 5, mostramos como el consumo de potencia crece en las dos topología, cuando la demanda de tráfico se incrementa. En primera instancia, podemos observar que el requerimiento de potencia del IP-NB se incrementa mucho más rápido que las otras dos arquitecturas.

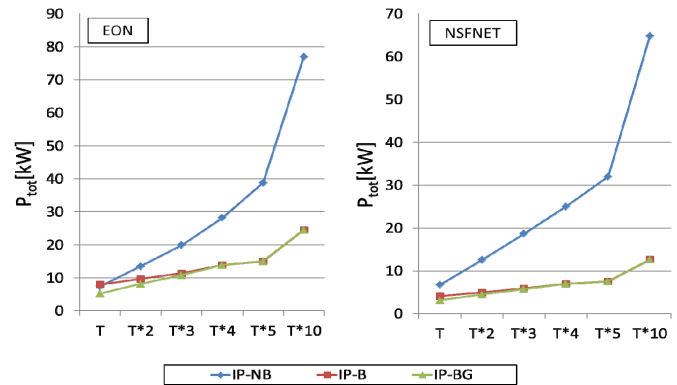


Figura 5. Consumo total de potencia con respecto al factor de escala de la matriz de tráfico.

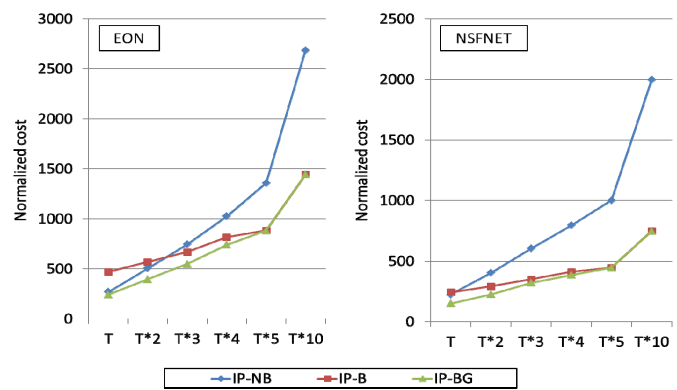


Figura 6. Costos normalizados obtenidos después de la minimización del consumo de potencia.

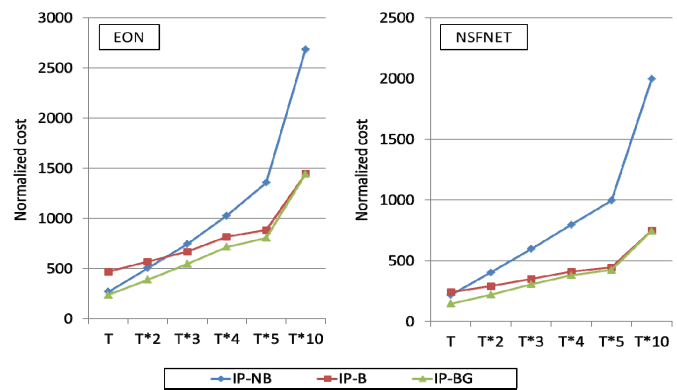


Figura 7. Costo total de la red con incrementos del factor de escala de matriz de tráfico.

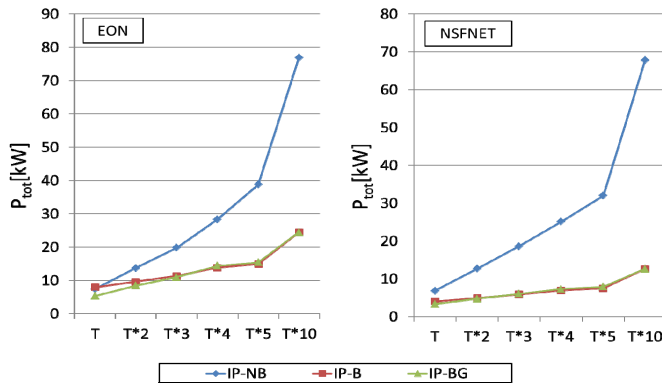


Figura 8. Consumos de potencia obtenidos después de la minimización de costo.

En segunda instancia, al incrementar la demanda de tráfico, la arquitectura IP-B es la que aprovecha más eficientemente la capacidad de cada canal de longitud de onda, debido a que cada demanda requiere un ancho de banda que tiende a ocupar la capacidad total de cada lightpath. En consecuencia, a altas cargas de tráfico (es decir, cuando la matriz de tráfico es escalizada por un factor mayor o igual a 4 en el caso EON y 3 para el caso NSFNET), la arquitectura IP-BG tiende a comportarse como una IP-B, evitando hacer agregación, y asignando la capacidad total de una (o más) longitud(es) de Onda a cada demanda de tráfico.

Ahora se calcula los costos totales de las tres arquitecturas cuando las topologías EON y NSFNET son diseñadas para minimizar el consumo de potencia: los resultados se muestran en la Fig. 6, y son obtenidos usando los costos normalizados descritos en la sección II. Los costos muestran que, cuando intentamos minimizar el consumo de potencia de la red, la solución IP-BG es no solo la más eficiente en potencia entre las tres, sino también la de menor costo. A bajas cargas de tráfico (especialmente para el caso EON), IP-NB es casi igual de económica a la IP-BG, pero cuando el tráfico crece, IP-NB llega a ser mucho más costosa que IP-BG y IP-B.

B. Minimización del Costo de la Red

Otro problema ha sido también considerado en este estudio: hemos diseñado una red para minimizar el costo y por lo tanto, el correspondiente consumo de potencia. En la Fig. 7, los resultados son mostrados para las dos tipologías de red con diferentes factores de escala de carga de tráfico. Del mismo modo que en el problema de minimización de potencia, se observa que IP-BG es la arquitectura más eficiente e IP-NB es la más costosa. A bajas cargas de tráfico, IP-B es una solución costosa debido al alto número de transponder necesarios, pero en la medida que el factor de escala del ancho de banda de tráfico crece, esta arquitectura aprovecha en un modo más eficiente la capacidad de la longitud de onda, convirtiéndose en una solución eficiente en costo.

Después de ser minimizado el costo total de la red para las tres arquitecturas, se observan los consumos de potencia correspondientes en la Fig. 8. Aun cuando buscamos minimizar el costo de la red, IP-BG es la arquitectura más eficiente en costo, mientras que, IP-NB es la más costosa, especialmente a altas cargas de tráfico, cuando la diferencia entre costos de IP-NB y las otras dos arquitecturas llega ser aún más alta.

Lo anterior mostrado, demuestra que el diseño de una red con eficiencia energética proporciona resultados análogos al diseño de una red bajo costo.

V. CONCLUSIONES

En este artículo, se ha comparado tres arquitecturas diferentes de transporte con respecto al consumo de potencia y costo. Las capacidades de hacer agregación en los nodos de red mejoran el ahorro de energía a través de un aprovechamiento más eficiente de la capacidad de red. Se ha utilizado formulaciones ILP para comparar tres diferentes arquitecturas de red de transporte con el fin de reducir al mínimo el consumo de energía o el costo de la red.

Los resultados de la simulación han demostrado que la arquitectura IP-BG es la solución más eficiente, tanto del punto de vista del consumo de energía como del costo. A bajas cargas de tráfico, la arquitectura IP-B tiene el peor desempeño entre las tres, ya que no se aprovechan de manera eficiente los recursos de red, mientras que, a altas cargas de tráfico, esta arquitectura proporciona ahorros de energía y costo; si se compara con la arquitectura IP-NB. IP-BG es una solución intermedia entre las otras dos, y de hecho, su comportamiento a bajas cargas de tráfico es similar a la solución IP-NB (es decir, realiza agregación con más frecuencia), pero a altas cargas tráfico, es similar a la solución IP-B (es decir, no se realiza agregación, ya que cada solicitud es capaz de ocupar toda la capacidad de las longitudes de onda requeridas).

Por último, también es interesante y útil notar que un diseño de red con eficiencia energética es también un diseño a bajo costo (cost-effective), especialmente porque los puertos del router IP desempeñan un papel dominante en las redes IP-sobre-WDM tanto desde el punto de vista del consumo de energía como del costo de la red.

REFERENCIAS

- [1] W. Vereecken, L. Deboosere, D. Colle, B. Vermeulen, M. Pickavet, B. Dhoedt, and P. Demeester, "Energy Efficiency in Telecommunication Networks," *Proc. of European Conference on Networks and Optical Communications & Optical Cabling and Infrastructure (NOC08)*, Krems, Austria, Jul. 2008.
- [2] G. Shen and R. Tucker, "Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 176–186, Jun. 2009.
- [3] E. Yetginer and G. Rouskas, "Power Efficient Traffic Grooming in Optical WDM Networks," *Proc. of IEEE GLOBECOM 2009*, Honolulu, Hawaii, Nov. 2009, pp. 1–6.
- [4] S. Huang, D. Seshadri, and R. Dutta, "Traffic grooming: a changing role in green optical networks," *Proc. of IEEE GLOBECOM 2009*, Honolulu, Hawaii, Nov. 2009, pp. 1–6.
- [5] M. M. Hasan, F. Farahmand, and J. P. Jue, "Energy-Awareness in Dynamic Traffic Grooming," *Proc. of Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference 2010 (OFC/NFOEC)*, San Diego, CA, USA, 21–25 Mar. 2010, pp. 1–3.
- [6] M. Xia, M. Tornatore, Y. Zhang, P. Chowdhury, C. Martel, and B. Mukherjee, "Greening the Optical Backbone Networks: A Traffic Engineering Approach," *Proc. of IEEE ICC 2010*, Cape Town, South Africa, 23–27 May 2010.
- [7] S. Aleksic, "Power Consumption Issues in Future High-Performance Switches and Routers," *Proc. of ICTON 2008*, Athens, Greece, 22–26 Jun. 2008, pp. 194–198.
- [8] P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "On the Energy Efficiency of Mixed-Line-Rate Networks," *Proc. of Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference 2010 (OFC/NFOEC)*, San Diego, CA, USA, 21–25 Mar. 2010, pp. 1–3.

- [9] Y. Gokdel, B. Sarioglu, and A. Yalcinkaya, "LED Integrated Miniaturized Polymer MEMS Display," in *Research in Microelectronics and Electronics*, 2008. PRIME 2008. Ph.D., Jun. 2008, pp. 93–96.
- [10] R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger, and D. A. Schupke, "Cost Modeling and Evaluation of Capital Expenditures in Optical Multilayer Networks," *Journal of Optical Networking*, vol. 7, no. 9, pp. 814–833, 2008.
- [11] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin, *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, 1993.
- [12] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*. McGraw-Hill, 1997.
- [13] K. Zhu and B. Mukherjee, "Traffic Grooming in an Optical WDM Mesh Network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 122–133, Jan. 2002.
- [14] M. Liu, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "New and Improved Strategies for Optical Protection in Mixed-Line-Rate WDM Networks," *Proc. of Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference 2010 (OFC/NFOEC)*, San Diego, CA, USA, 21–25 Mar. 2010, pp. 1–3.



Stefano Bregni (M'93-SM'99) es Profesor Asociado del Politecnico di Milano del curso de redes de telecomunicaciones. Nació en Milán, Italia, en 1965. En el 1990 se graduó en ingeniería de telecomunicaciones en el Politecnico di Milano. Desde 1991 trabaja en las áreas de SDH y sincronización de redes, con especial atención en medida de estabilidad de frecuencia del reloj, primero con SIRTI S.p.A. y, posteriormente con CEFRIEL. En 1999, se unió

al Politecnico di Milano como Profesor Asistente titular. Ha sido Miembro Sénior de IEEE desde 1999. Desde 2004, ha sido Conferencista Distinguido de la IEEE Communications Society, donde desempeña las siguientes posiciones oficiales: Vocal de la Junta de Gobernadores (2010 a 2012), Director de Educación (2008-2011), Presidente del Comité Técnico de Transmisión, Acceso y Sistemas Ópticos (TAOS) (2008-2009; Vicepresidente 2002-2003, 2006-2007; Secretario 2004-2005) y Vocal del comité Globecom/ICC Technical Content (2007-2010). Es o ha sido Vice-Presidente del Programa Técnico de IEEE GLOBECOM 2012, Presidente de los Simposios GLOBECOM 2009 y Presidente de Simposio de otras ocho conferencias ICC/GLOBECOM. También fue Vicepresidente Técnico de la conferencia IEEE Optical Network Design and Modelling 2005. Editor del IEEE Global Communications Newsletter y Editor Asociado de la revista IEEE Communications Surveys and Tutorials) Fue Conferencista tutor en cuatro conferencias IEEE ICC y GLOBECOM. Sirvió en comités ETSI y UIT-T de sincronización de red digital. Es autor de alrededor de 70 artículos, la mayoría en conferencias y revistas de la IEEE, y de los libros *Synchronization of Digital Telecommunications Networks* (Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2002; traducido y publicado en ruso por MIR, 2003) y *Sistemas de Trasmisión PDH y Multiplexación SDH (Sistemi di trasmissione PDH e SDH - Multiplazione*. Milano, Italia: McGraw-Hill, 2004). En la actualidad sus temas de investigación se enfocan principalmente en modelado de tráfico y redes ópticas.



Vida Grković actualmente está completando su segunda maestría en Telecomunicaciones en la Universidad de Zagreb, como parte final del Programa de Doble Titulación con el Politecnico di Milano en el marco T.I.M.E. En el 2010 recibió su primer título de maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones en el Politecnico di Milán.



Francesco Musumeci (S'11) nació en 1985. En el 2006, recibió el título de Ingeniería de Telecomunicaciones en la Università degli Studi di Catania (cum laude), con una tesis sobre filtros RF usados para antenas de microcintas. En el 2009, obtuvo el título de maestría (cum laude) en Ingeniería de Telecomunicaciones en el Politecnico di Milano, con una tesis sobre técnicas y tecnologías para la realización de búferes ópticos a través de líneas de retardo conmutadas. Desde el 2010, es estudiante de doctorado en el Departamento de Electrónica e Información del Politecnico di Milano. Su área interés es redes de telecomunicaciones, en especial, con referencia a la conmutación óptica, memorias ópticas y el consumo de potencia en las redes ópticas de alta velocidad. También hace parte del proyecto italiano de investigación BESOS (Bandwidth efficiency and Energy Saving by sub-lambda Optical Switching) y del séptimo Programa Marco Europeo de la Red de Excelencia TREND (Towards Real Energy-efficient Network Design).



Francesca Vismara recibió el título de maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones en el Politecnico di Milano en el 2010. Actualmente trabaja en el Equipo de Revisión de Aplicaciones de Samsung Electronics Italia S.p.a.



Massimo Tornatore (S'03-M'07) trabaja actualmente como Profesor Asistente en el Departamento de Electrónica e Información del Politecnico di Milano, donde recibió el título de Doctor en Ingeniería de la Información en el 2006 y el título de Laurea (equivalente a la Maestría) en el 2001. También fue profesor asistente visitante en el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de California, Davis, donde trabajó como investigador postdoctoral en el 2008 y 2009. Es autor de alrededor de 90 conferencias y artículos en revistas. Sus intereses de investigación incluyen el diseño, la protección, la eficiencia energética, la agregación de tráfico en redes ópticas WDM y seguridad de las comunicaciones del grupo. Fue co-ganador del Premio al Mejor Artículo de las conferencias de IEEE ANTS 2008, ANTS 2009, Latincom 2010 y GLOBECOM 2008 (Simposio de Redes Ópticas).