

Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, Optical Burst Switching), Perspectivas Actuales y Futuras

Optical Burst Switching (OBS), Current and Future Perspectives

Antonio Venegas, María Soledad Jiménez, y Paola Venegas

Resumen— En este artículo se realiza un recorrido de la evolución del networking óptico con énfasis en la tecnología de conmutación óptica de ráfagas (Optical Burst Switching, OBS), que actualmente se encuentra en estado de desarrollo e investigación, y sus perspectivas actuales y futuras que apuntan a visualizar este paradigma como una solución prometedora para el Internet óptico de nueva generación, que podría ser adoptada para el transporte de información en el nivel de core y dentro de los centros de datos, con el fin de minimizar el procesamiento electrónico para superar el cuello de botella de los enrutadores actuales, en comparación con las altas velocidades de transmisión alcanzadas en el nivel óptico, y a su vez enrutar y conmutar grandes volúmenes de información ensamblados en ráfagas en el dominio completamente óptico.

Palabras clave— Conmutación óptica de ráfagas, pérdida de ráfagas, tecnologías habilitantes, demostradores, amenazas de seguridad, centros de datos, redes definidas por software.

Abstract— This paper intends to take a tour of the evolution of optical networking with emphasis on the Optical Burst Switching (OBS) technology, which is currently in a state of development and research, and its current and future perspectives, that aim to visualize this paradigm as a promising solution for the new generation Optical Internet, which could be adopted for the transport of information at the core level and within the data centers, in order to minimize electronic processing to overcome the bottleneck of current routers compared to the high transmission speeds achieved at the optical level, and in turn routed and switched large volumes of information assembled in bursts in the fully optical domain.

Index Terms— Optical Burst Switching (OBS), Burst Loss Probability (BLP), enabling technologies, testbeds, security threats, datacenters, Software Defined Networks (SDN).

Article history:

Received 01 July 2019

Accepted 03 September 2019

A. Venegas estuvo en la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Av. 12 de Octubre 1076, Vicente Ramón Roca, Quito, Ecuador. Actualmente está prestando sus servicios profesionales en el sector privado (e-mail: toni.venegas78@gmail.com).

I. INTRODUCCIÓN

PARA el desarrollo de este trabajo se utilizó el método deductivo, partiendo de una perspectiva general en cuanto al crecimiento en la demanda del tráfico de Internet que cursa a través de las redes actuales y sus principales tecnologías, enmarcadas dentro de la evolución del networking óptico, para luego ampliar el estudio con un enfoque particular sobre la tecnología OBS y sus perspectivas actuales y futuras. Para este propósito se empleó información obtenida de distintos documentos digitales como libros, tesis y artículos publicados en la literatura científica sobre este tema de gran relevancia en los últimos años, seleccionados de repositorios y hemerotecas digitales de ámbito científico como Scopus, Springer, IEEE, etc., así como también de exposiciones en congresos internacionales y disertaciones de grado, con el fin de garantizar su confiabilidad y validez.

El entorno dinámico en el cual el tráfico de datos es el principal protagonista, ha conducido a una demanda continuamente creciente de mayor ancho de banda, que ha experimentado una evolución exponencial en los últimos años, debido principalmente a la proliferación del acceso a Internet, que seguramente se intensificará con el advenimiento del Internet de las cosas (Internet of Things, IoT), y a la adopción cada vez mayor de aplicaciones intensivas en banda ancha como transferencias de archivos de gran tamaño, streaming de audio/video, juegos multi-participante en línea, grid computing, cloud computing, distribución de contenidos, y muchas otras aplicaciones multimedia con exigencias en tiempo real, que precisan mayores capacidades y tasas de transmisión en el backbone de la red para poder satisfacer los requerimientos actuales y futuros, donde las crecientes demandas de usuarios residenciales (100's de Mbps con movimiento hacia Gbps) y empresariales (10 Gbps), las necesidades actuales de usuarios científicos (10-40 Gbps), así como también posibles servicios imaginativos (p.ej. multimedia con experiencias en 3D

M. Jiménez está en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-25, 170525 Quito, Ecuador (e-mail: maria.jimenez@epn.edu.ec).

P. Venegas estuvo en la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Av. 12 de Octubre 1076, Vicente Ramón Roca, Quito, Ecuador. Actualmente está prestando sus servicios profesionales en el sector privado (e-mail: paola.venegas.187@gmail.com).

interactivas y virtuales combinados con formatos de alta definición y realidad aumentada) que se podrían visualizar en el futuro, siguen impulsando el desarrollo de nuevas tecnologías para las redes ópticas del futuro [1] [2].

Ante esta realidad, la tecnología óptica y en concreto los conmutadores ópticos son una alternativa mucho más eficiente para conmutar altas tasas de bits e interconectar subsistemas más distantes a altas velocidades de transmisión, considerándose como base para las redes de transporte que se encuentran en su etapa de evolución hacia las denominadas redes todo ópticas, dando lugar a la aparición de técnicas de conmutación óptica como: OCS (Optical Circuit Switching), OPS (Optical Packet Switching) y OBS que se encuentran dentro del segundo y tercer nivel de la escala evolutiva del networking óptico, como se ilustra en la Fig. 1. En esta figura se evidencia el avance progresivo desde redes de primera generación estáticas con enlaces punto a punto y conversiones O/E/O costosas, a redes OCS actuales de segunda generación interconectadas en anillo o malla con soporte orientado a la conexión y capacidades de enrutamiento y conmutación en el dominio óptico con elementos reconfigurables como ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) con conmutadores ópticos WSS (Wavelength Selective Switch) y tecnología OTN (Optical Transport Network), que emplean un plano de control basado en ASON (Automatically Switched Optical Networks) o GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) o SDN (Software Defined Network), hasta redes de tercera generación que se visualizan como redes con soporte de networking óptico no orientado a la conexión (OPS/OBS) con enrutadores de alta velocidad en los nodos de ingreso, y en el core una malla de fibras con múltiples longitudes de onda mediante elementos reconfigurables interconectados de alta capacidad; siendo evidente una reducción en cuanto a la granularidad del tráfico requerido [2].

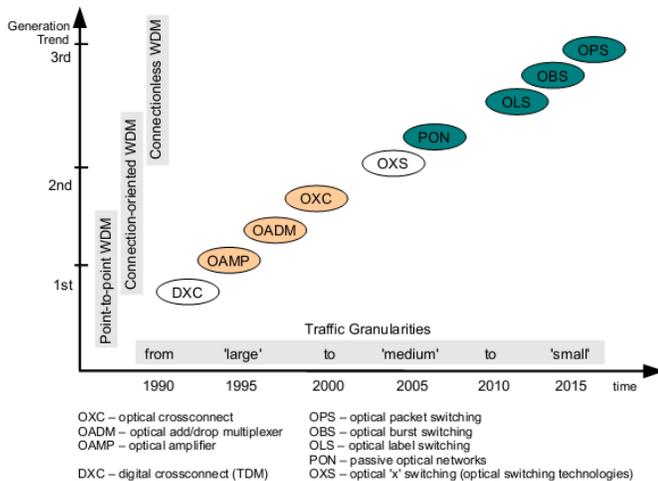


Fig. 1. Evolución del networking óptico [1]

A. Desarrollos recientes y desafíos técnicos en sistemas de transmisión de alta capacidad

La evolución de las redes a sistemas de alta capacidad, implementados sobre la misma infraestructura de red existente, que hoy en día pueden operar con canales ópticos a tasas superiores a 100 Gbps, cada uno, se dio gracias al avance significativo relacionado con los formatos de modulación avanzados y esquemas de detección coherente, que permiten un elevado rendimiento y transmisión óptica con alta eficiencia espectral. Los sistemas de transmisión DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) convencionales se basan principalmente en canales de 10 Gbps con modulación OOK (On Off Keying) sobre una grilla de canales de 50 GHz con una eficiencia espectral de 0.2 b/s/Hz. Sin embargo, en la transmisión de velocidades superiores a 10 Gbps, los efectos de distorsión de la fibra óptica como la dispersión cromática (Chromatic Dispersion, CD), la dispersión por modo de polarización (Polarization Mode Dispersion, PMD), el ruido y otros efectos no lineales se vuelven más severos, impactando fuertemente en el desempeño de la transmisión y afectando drásticamente la calidad de la señal. Por lo cual, la mejora en cuanto a la capacidad y escalabilidad de los sistemas actuales requiere que canales ópticos de 40 Gbps y 100 Gbps, sean transportados sobre la misma infraestructura de red existente, siendo necesario abordar varios desafíos técnicos como: 1) el ancho de banda espectral óptico debe ser similar al de 10 Gbps OOK; 2) la distancia de transmisión debe ser de preferencia comparable a la de los canales de 10 Gbps. Esto implica la necesidad de formatos avanzados de modulación espectralmente más eficientes, basados en portadora única como PM-QPSK (Polarization Multiplexed Quadrature Phase Shift Keying) o en multi-portadora como OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing), y esquemas de detección coherente (p. ej. CO-OFDM), para que las tolerancias de la señal al ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission), CD, PMD, y no linealidad de la fibra no se vean comprometidas con el incremento de la velocidad de datos por canal [3]. En contraste con la tecnología existente de detección directa, un sistema de detección coherente tiene muchas ventajas entre las cuales se pueden mencionar las siguientes [4]:

- Incremento de la sensibilidad del receptor de 15 a 20 dB.
- Compatibilidad con formatos de modulación como DPSK (Differential Phase Shift Keying) o DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).
- Detección simultánea de la amplitud, fase y polarización de la señal óptica que permite aumentar la tolerancia a las deficiencias de la red e incrementar la capacidad de detección y la eficiencia espectral con el fin de transmitir mayor información con el mismo ancho de banda óptico, mejorando así el rendimiento del sistema.
- Mejor rechazo a la interferencia de canales adyacentes en sistemas DWDM, permitiendo que más canales sean transportados dentro de la banda de transmisión.

Por otro lado, el interés de la comunidad científica y de la industria, se está centrando cada vez más en el desarrollo de tecnologías emergentes como: 1) administración y control centralizado de redes ópticas bajo una arquitectura de red definida por software, SDN, basada principalmente en OpenFlow para proveer redes reprogramables con mayor flexibilidad, dinamicidad, autonomía, rápido aprovisionamiento y restauración de servicios; 2) el concepto de espectro de grilla flexible (flex-grid), que dio lugar a las denominadas redes ópticas elásticas [5] para superar las limitaciones de usar una grilla fija con separación entre canales de 50 GHz para tasas superiores a 400 Gbps; siendo necesario el uso de transmisión multi-portadora y esquemas de modulación adaptativos (p.ej. de acuerdo a las características del enlace) combinado con asignaciones flexibles y eficientes del espectro, para la transmisión de información basada en sus requerimientos de uso, aprovechando así el espectro óptico de una manera más eficiente, y reduciendo al mismo tiempo el costo de energía por bit transmitido. En estas redes el procesamiento digital de señales y los transpondedores flexibles desempeñarán un papel fundamental [5]. Finalmente, la introducción de fibras multi-núcleo junto con tecnologías de redes elásticas y de multiplexación por división de espacio (Space Division Multiplexing, SDM) se podrían visualizar en el largo plazo para enfrentar los retos del futuro.

Los sistemas comerciales actuales se soportan principalmente en la tecnología OTN que emplea esquemas de modulación avanzados y detección coherente, con planos de control basados en ASON o GMPLS y que permiten transportar canales ópticos de 10/40/100/200 Gbps y más recientemente 400 Gbps, con una tendencia cada vez mayor hacia arquitecturas basadas en SDN. Aunque estos grandes avances han conducido a redes de transporte de alta capacidad más inteligentes y flexibles, todavía utilizan la técnica de conmutación OCS que no ofrece una granularidad en escalas de sub-longitud de onda y por tanto que no es adecuada para el tráfico de datos dominante en las redes actuales, además que carece de multiplexación estadística, lo que se traduce en una subutilización del ancho de banda disponible, por lo cual se hace evidente la introducción de cambios tecnológicos que permitan proveer una plataforma de red multi-servicios que permita la adaptación de distintos formatos de datos, el soporte de altas tasas de transmisión, y una provisión flexible de anchos de banda, que se consideran factores clave para el Internet de próxima generación. En este sentido, es importante dar un paso adelante en favor de nuevas tecnologías de conmutación, como es el caso de OBS, visualizada como una solución prometedora para el Internet óptico de nueva generación, que podría ser adoptada en el core de la red y dentro de los centros de datos, con el fin de minimizar el procesamiento electrónico superando así el cuello de botella de los enrutadores actuales, y a su vez enrutar y conmutar a nivel completamente óptico grandes volúmenes de información ensamblados en ráfagas, cuya evaluación en términos de desempeño y adaptabilidad en cuanto al tráfico con naturaleza a ráfagas que se experimenta en el Internet, ha mostrado resultados interesantes en los distintos estudios y pruebas realizadas, que se resumen en el siguiente apartado en la sección de Testbeds, así como también ciertas

restricciones especialmente en cuanto al tema de contenciones, debido a la limitación del buffering óptico propio de la inmadurez de la tecnología fotónica actual.

II. CONMUTACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS (PERSPECTIVAS ACTUALES)

La conmutación óptica de ráfagas [6] [7] es una de las tecnologías más prometedoras para transmitir el tráfico a ráfagas sobre una infraestructura completamente óptica, que surge como una alternativa a una propuesta de OCS poco flexible y a una solución OPS tecnológicamente inmadura todavía. La tecnología OBS que se soporta en los avances de varios elementos clave de la red, incluyendo conmutadores totalmente ópticos, receptores en modo de ráfaga óptica y convertidores de longitudes de onda [8], ha recibido considerable atención en los últimos años, y sobre su base se han propuesto y analizado diferentes soluciones en un intento de mejorar su rendimiento, incluyendo técnicas de ensamblado de ráfagas, esquemas de planificación de canal, métodos de resolución de contenciones y provisión de QoS.

Aunque aún se encuentra en estado de desarrollo, es decir que no ha sido estandarizada todavía, OBS está siendo considerada actualmente como una de las arquitecturas todo ópticas más prometedoras para el Internet óptico de nueva generación [9]. Entre otras razones, el éxito de OBS se debe principalmente a dos características fundamentales: 1) se basa en esquemas de señalización de una vía para reducir el retardo asociado con el tiempo de ida y vuelta; y 2) utiliza un pequeño encabezado de control para transportar una gran cantidad de datos de carga útil [1].

A. Arquitectura de la red OBS

Una red OBS está compuesta de nodos de conmutación óptica de ráfagas interconectados mediante enlaces de fibra óptica, que soportan múltiples canales de longitud de onda utilizando DWDM. Los nodos en una red OBS se pueden clasificar en nodos de edge (de ingreso o egreso) y nodos de core [10].

Los nodos de edge conocidos también como enrutadores de borde, tal y como su nombre lo indica, se encuentran en el límite de la red OBS, y actúan como interfaz para proporcionar las funcionalidades necesarias para la interoperación entre el mundo externo (redes de clientes) y la red OBS. Por otro lado, los nodos de core referidos también como enrutadores centrales o nodos intermedios, componen el core interno de la red OBS. El nodo de ingreso es responsable principalmente de ensamblar los paquetes provenientes del mundo exterior en bloques de mayor tamaño denominados ráfagas, y planificarlas para su envío a través de canales ópticos de salida. Antes de transmitir una ráfaga, el nodo de ingreso genera un paquete de control (Burst Header Packet, BHP), que contiene la información necesaria para la reserva de recursos a lo largo de la red para la transmisión de la ráfaga, la cual se envía un tiempo después, denominado offset, de su correspondiente paquete de control.

Por otro lado, el nodo de core se encarga principalmente de conmutar las ráfagas que llegan a un puerto de entrada hacia un puerto de salida, en base a la información proporcionada por los paquetes de control y de controlar las contenciones de ráfagas

que se transmiten en el dominio completamente óptico a lo largo del core de la red, sin ningún tipo de almacenamiento en los nodos intermedios. Finalmente, el nodo de egreso se encarga de recibir las ráfagas de datos y desensamblarlas en sus paquetes originales, para posteriormente reenviarlos hacia las redes cliente de destino.

La arquitectura genérica del enrutador de edge consta básicamente de un módulo de enrutamiento (Routing Module, RM), un ensamblador de ráfagas y un planificador, que cumplen distintas funciones como pre-clasificación de paquetes, almacenamiento de paquetes en buffers electrónicos, ensamblado de paquetes en ráfagas, y desensamblado de ráfagas. Por otra parte, la arquitectura genérica del enrutador de core se compone de una Unidad de Control de Conmutación (Switch Control Unit, SCU) y un conmutador óptico (Optical Cross Connect, OXC). La SCU crea y mantiene una tabla de reenvío y es responsable de la configuración del OXC. Cuando la SCU recibe un paquete de control, consulta los procesadores de enrutamiento y señalización para identificar el puerto de salida en base al destino. Si el puerto de salida está disponible cuando llega la ráfaga de datos, el OXC se configura de manera que permita el paso de dicha ráfaga; por el contrario, si el puerto no está disponible, el OXC se configura en función de la política de resolución de contenciones implementada. Adicionalmente, la SCU tiene otras responsabilidades importantes que incluyen el procesamiento de la cabecera, planificación de ráfagas, detección y resolución de contenciones, reescritura de la cabecera, y control de los convertidores de longitudes de onda [8].

B. Tecnologías habilitantes para OBS

1) Tecnología de conmutación óptica y láseres sintonizables ultra-rápidos

En la Tabla I se presenta un resumen de las principales tecnologías de conmutación y láseres sintonizables (Tunable Lasers, TL) utilizados en OBS. En el primer caso se pueden distinguir dos clases de conmutadores a la hora de considerar su tecnología de fabricación base: 1) de espacio libre, como (p.ej. MEMS Micro Electrical Mechanical Systems); y 2) guía de onda, como (p. ej. MZI Mach-Zehnder Interferometer, MMR Micro-ring Resonator), electro-ópticos PLZT (Lead Zirconate Titane)¹, electro-absorción (Electro-Absorption Modulator, EAM), combinaciones basadas en láseres sintonizables y conversores de longitud de onda, cada uno en conjunto con el enrutador de arreglo de rejillas de guías de onda (Arrayed Waveguide Grating Router, AWG) para formar el equivalente de una funcionalidad de conmutación espacial, donde el camino a través del AWG se determina por la longitud de onda en su puerto de entrada, siendo los basados en SOA (Semiconductor Optical Amplifier) y en PLZT, los que han sido utilizados en los prototipos y testbeds desarrollados más recientemente. En el segundo caso se pueden destacar principalmente los láseres que se basan en la selección entre múltiples cavidades (p.ej. MFL, Multi-Frequency Laser), y otros en sintonizar elementos de una cavidad, como los grating o resonadores de anillo, (p.ej. SG-DBR, Sampled Grating Distributed Bragg Reflector). Además, se pueden mencionar los láseres VCL (Vertical-Cavity Laser) con una sección de sintonización pasiva, basados en el efecto plasma de portadores libres (absorción de fotones por parte de los portadores libres) en combinación con el desplazamiento del espectro de ganancia inducido por la temperatura.

TABLA I
TECNOLOGÍAS DE CONMUTACIÓN ÓPTICA Y LÁSER SINTONIZABLES PARA OPS/OBS [11]

Tecnología	Tiempo de conmutación/sintonización	Características	Escalabilidad	Aplicación
MEMS 2D/3D	~50 μ s / ~10 ms	Alta transparencia, pérdida razonable/baja	50x50/ 320x320	OBS
Mach-Zehnder/MMR (termo-óptico)	~10 ³ μ s	Alta transparencia, alta pérdida/ pérdida razonable	32x32/ 8x8	OBS
PLZT MZI	~10 ns	Alta transparencia, alta pérdida	8x8	OPS, OBS
LiNbO3 MZI	~1 ns	Transparencia razonable, alta pérdida	32x32	OPS, OBS
TWC + AWGR	~10 ³ s ns	Baja transparencia, pérdida razonable	10 ³ s × 10 ³ s	OPS, OBS
TL + AWGR	~10 ³ s ns	Alta transparencia, baja pérdida	100 ³ × 100 ³ s	OPS, OBS
EAM Broadcast & Select (B&S)	~1 ns	Alta Transparencia, alta pérdida	8x8	OPS, OBS
SOA B&S/ multi-etapa	~1 ns / < 10 ns	Alta transparencia, pérdida razonable	64x64/ 16x16	OPS, OBS
Semiconductor Optical Phase Array ^a	~20 ns	Alta transparencia, pérdida razonable	64x64	OPS, OBS
MFL	< 1 ns	32-56 canales 100 GHz		
SG-DBR	45 ns 5 ns	32 canales 100 GHz		
VCL	~1-11 ns	16-32 canales 100 GHz		

^a Tecnología basada en dos fenómenos físicos. El primero es el patrón de interferencia de una rejilla óptica, que se forma de franjas claras y oscuras a cierta distancia de la rejilla cuando se ilumina con luz coherente (p.ej. láser); y el segundo es el fenómeno basado en el efecto electro-óptico.

¹ Material ferroeléctrico transparente que presenta varios efectos electro-ópticos no lineales como birrefringencia/dispersión de la luz variable, siendo

uno de los más utilizados para la conmutación óptica debido a su facilidad de fabricación y costo [12] [13].

2) Receptores en modo ráfaga

Los receptores tradicionales utilizados en los sistemas de transmisión óptica no son adecuados para la conmutación óptica de ráfagas, porque consideran que las componentes de fase y potencia de la señal entrante se mantienen constantes, y que dicha señal está siempre presente, lo cual no ocurre en una red OBS puesto que la fase y potencia de las ráfagas que llegan a un determinado receptor pueden presentar variaciones debido a que arriban de distintas fuentes y pueden haber atravesado diferentes rutas a través de la red; además que la señal está presente únicamente durante el período de duración de una ráfaga, por lo que es necesario emplear receptores en modo ráfaga para adaptarse a estas condiciones. Otra característica de estos dispositivos es su alta velocidad de adquisición de reloj, que ha sido probada en escenarios de laboratorio con receptores capaces de recuperar el sincronismo de una señal entrante de 10-25 Gbps con separación de 100 GHz (y 50 GHz) en decenas de ns (y μ s) [14] [15] [16].

3) Convertidores de longitud de onda

En redes de conmutación óptica de ráfagas que utilizan WDM, es deseable disponer de capacidades de conversión de longitud de onda en cada nodo para reducir la contención. Existen algunos métodos que se han desarrollado para realizar la conversión de longitud de onda, entre los cuales se pueden mencionar: conversión O/E/O, modulación de fase cruzada (Cross-Phase Modulation, XPM) y mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing, FWM); estas últimas emplean los efectos no lineales que se producen en la fibra debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad de la luz [8].

4) Inconvenientes de la capa física

Para el diseño de una red óptica de alta capacidad, se deben tomar en cuenta una serie de restricciones propias de la capa física que incluyen atenuación, dispersión y no linealidades de la fibra óptica, que pueden conducir a limitaciones en una fibra óptica monomodo utilizada en sistemas de transmisión basados en DWDM, que incluyen a las redes OBS. Debido a que el efecto de la dispersión cromática es directamente proporcional al cuadrado de la tasa de transmisión, y a que la ráfaga de datos utiliza un canal de mayor capacidad como portadora óptica con relación al paquete de control, la carga útil de la ráfaga transmitida tiene mayor posibilidad de que se degrade e interfiera con el paquete de control. De igual manera, la distorsión causada por la dispersión por modo de polarización que afecta a tasas de transmisión mayores, podría causar aparte de la interferencia entre símbolos, problemas de sincronización en las redes OBS, donde la cabecera de la ráfaga se envía normalmente en una longitud de onda diferente de la que se utiliza para la ráfaga de datos. Cada una de estas longitudes de onda experimentará distintos grados de dispersión, causando que la cabecera y la ráfaga tiendan a separarse o acercarse más en el dominio del tiempo; lo cual se podría mitigar si se conocen las distancias físicas de cada enlace y el perfil de dispersión de

la fibra, ajustando apropiadamente el tiempo de offset en el nodo de origen [8].

Por otro lado, el efecto conocido como wavelength skew², correspondiente a la desviación en el tiempo de llegada de los canales ópticos, que puede afectar también este tipo de sistemas, específicamente alterando el tiempo de offset entre la ráfaga de datos y el paquete de control. En este sentido en la presentación realizada por [17] se mencionan como alternativas, un esquema de compensación de dispersión sintonizable para contrarrestar dichos efectos, así como también el monitoreo dinámico de sistemas OBS incluyendo parámetros de potencia, longitud de onda, OSNR y distorsión (CD, PMD y no linealidades) en un amplio rango de longitudes de onda para las ráfagas de datos y paquetes de control, a fin de: 1) soportar nodos de ensamblado libres de error combinados con compensadores sintonizables; 2) mantener el tiempo de offset; 3) localizar y medir la distorsión de la ráfaga de datos y paquetes de control; y 4) aislar diferentes efectos de degradación. Para separar los efectos de CD de PMD se puede utilizar el filtrado óptico de banda lateral vestigial (Vestigial Sideband Optical Filtering), puesto que el retardo de tiempo entre las dos señales VSB (inferior y superior) es función de CD, y los bits se pueden recuperar de cualquiera de los dos lados del espectro. Por otro lado, y con relación a las técnicas de monitoreo de PMD, se pueden mencionar: 1) la medición de apertura de ojo, que se puede integrar con la equalización electrónica, pero requiere dispositivos de alta velocidad (demostrado para una señal RZ de 160 Gbps) y es afectada por otras fuentes de distorsión; 2) análisis del espectro, que se caracteriza por su simplicidad, pero es afectada también por otras fuentes de distorsión, y los rangos de sensibilidad y retardo diferencial de grupo (DGD, Differential Group Delay) dependen de la frecuencia monitoreada; y 3) la medición del grado de polarización, que no requiere de electrónica de alta velocidad, es independiente de la tasa de transmisión, depende sólo del PMD y no es afectada por otras fuentes de distorsión, aunque es dependiente del ancho del pulso [17]. Adicionalmente, se pueden también mencionar en este punto, los esquemas de detección coherente expuestos en el apartado anterior, como alternativas para mitigar los efectos de la dispersión que podrían impactar el desempeño de las redes OBS.

C. Ensamblado de ráfagas

El ensamblado de ráfagas es el proceso mediante el cual un nodo de ingreso agrupa una determinada cantidad de paquetes provenientes de las capas superiores, en unidades de mayor tamaño denominadas ráfagas (algunas decenas o centenas de kilobytes), en función de una política de ensamblado predefinida y las envía hacia el core de la red OBS en el dominio completamente óptico. A medida que los paquetes arriban a la interfaz de un nodo de ingreso, éstos son pre-clasificados y almacenados temporalmente en buffers electrónicos, en función de tráfico con características similares

² El término skew se aplica en sistemas de transmisión en paralelo, y está relacionado con la desviación en el tiempo de llegada de las señales de transmisión, en este caso las longitudes de onda, la debido al retardo de grupo.

relacionadas principalmente con su destino y clase de servicio, esta última utilizada opcionalmente para la provisión de QoS (Quality Of Service). Por otro lado, cuando las ráfagas llegan al nodo egreso de destino son desensambladas en sus paquetes originales para ser enviadas posteriormente hacia las redes cliente de destino.

Las políticas de ensamblado se definen en función de al menos uno de los siguientes criterios basados en umbral: vencimiento de un temporizador, tamaño máximo de ráfaga o una combinación de ambos, que definen la creación y envío de una ráfaga de datos, así como su característica de llegada al core de la red OBS. Los parámetros involucrados en estas políticas, incluyen un tiempo de umbral T , una longitud mínima de ráfaga B_{min} , y una longitud máxima de ráfaga B . B_{min} se puede calcular en base al tiempo de procesamiento del BHP en cada nodo y a la relación entre los canales de control y el número de canales de datos en la fibra [8]. Por otro lado, los umbrales T y B se pueden establecer de forma predefinida o dinámica, dando lugar a los algoritmos de ensamblado basados en tiempo, longitud de ráfaga, mixtos o híbridos y dinámicos, entre los que se pueden mencionar los algoritmos con capacidades de QoS y de predicción de tráfico, como BASTP (Burst Size and Assembly Time Prediction), ATH-FMTL (Adaptive-Threshold with Fixed Maximum Time Limitation), ACCS (Adaptive Classified Cloning and Aggregation Scheme), que en su mayoría se enfocan en reducir el retardo extremo a extremo, que constituye un aspecto importante a considerar para las aplicaciones sensibles a este parámetro [18].

D. Señalización

Para que una ráfaga de datos pueda atravesar los diferentes nodos de una red OBS, es necesario implementar un esquema de señalización que permita asignar los recursos en cada uno de los nodos (puerto y longitud de onda) y pre-configurar los OXC de manera que toda la red esté preparada para permitir el paso de la ráfaga de datos, esto debido a la naturaleza sin almacenamiento propia de esta tecnología; lo cual se consigue normalmente enviando el BHP fuera de banda, es decir, por un canal óptico diferente del que se emplea para la ráfaga de datos, la cual se transmite un tiempo de offset después de su correspondiente BHP. Dicha separación, permite a este tipo de redes transportar grandes capacidades de información en el dominio completamente óptico con un reducido procesamiento electrónico. En general, un esquema de señalización se puede clasificar de acuerdo a las siguientes características [8]:

- Dirección en una sola vía, en dos vías o híbrida.
- Iniciación por origen, por destino o por nodo intermedio.
- Recurso persistente o no persistente.
- Reservación de recursos inmediata o retardada.
- Liberación de recursos explícita o implícita.
- Control centralizado o distribuido.

Los esquemas de señalización más populares para redes OBS son JIT (Just-In-Time) y JET (Just-Enough-Time). JIT se basa en un esquema de reserva inmediata y liberación explícita (podría también ser implícita), donde cada nodo OBS configura

su OXC para la ráfaga entrante a partir de la recepción de su correspondiente BHP, conduciendo a una reserva anticipada del canal antes de la llegada de la ráfaga de datos y por ende a una asignación ineficiente de los recursos. Por el contrario, JET emplea métodos de reserva retardada y liberación implícita, donde cada nodo OBS configura su OXC justo antes de la llegada de la ráfaga de datos y libera los recursos automáticamente al finalizar la duración de la misma, permitiendo así una asignación más eficiente del canal y por ende una menor probabilidad de bloqueo, así como también una disminución de la latencia; siendo el protocolo más adecuado para el tipo de redes de OBS, con algunas variantes mejoradas implementadas posteriormente, como S-JET (Slotted JET), QoS-enhanced JET, pudiendo incluso, con ciertas modificaciones, ser utilizado en entornos avanzados basados en grid computing [11] [19] [20].

E. Planificación de canal

En una red OBS, las ráfagas de datos generalmente pueden tener diferentes tamaños y tiempos de offset, pudiendo arribar no en el mismo orden que sus paquetes de control, lo cual conduce a pensar en una fragmentación del ancho de banda en espacio y tiempo, donde los canales ópticos a través de los cuales se transmite la información, incluyen huecos o vacíos entre ráfagas consecutivas. Es así que cuando una ráfaga llega a un nodo, se le debe asignar una longitud de onda disponible sobre un enlace de salida durante un determinado tiempo, para su transmisión a lo largo del dominio OBS. El objetivo fundamental de la planificación es minimizar los vacíos en cada programación de canal, es así que un algoritmo de planificación eficiente, debería ser capaz de ajustar un período de reserva nuevo en un intervalo vacío existente siempre que sea posible, a fin de incrementar la utilización del ancho de banda y reducir la tasa de pérdida de datos [21].

La planificación de los canales en redes OBS difiere de la planificación tradicional de paquetes IP, ya que en este caso los enrutadores cuentan con buffers electrónicos que permiten almacenar temporalmente los paquetes entrantes y planificarlos adecuadamente en función de su destino y opcionalmente de sus requerimientos de QoS, a través del puerto de salida correspondiente. En OBS, por el contrario, una vez que llega una ráfaga de datos a un nodo central, se la debe enviar directamente al siguiente nodo sin ningún tipo de almacenamiento electrónico. Como parte de los mecanismos de planificación de ráfagas para minimizar los huecos generados a medida que éstas se transmiten, se han definido una serie de algoritmos que se pueden dividir principalmente en dos categorías [7]: algoritmos de planificación sin relleno de huecos (p.ej. LAUC Latest Available Unscheduled Channel y algoritmos de planificación con relleno de huecos (p.ej. LAUC-VF Latest Available Unscheduled Channel with Void Filling, Min-SV (Starting Void)/EV(Ending Void), Best Fit) que difieren en cuanto a una mayor simplicidad (o complejidad) computacional, resultando en un menor (o mayor) uso de ancho de banda y una mayor (o menor) BLP (Burst Loss Probability), respectivamente. La Tabla II presenta un resumen descriptivo que compara el desempeño de algunos de ellos.

TABLA II
COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN [7]

Algoritmo de Planificación	Complejidad Temporal	Información de estado	Uso de ancho de banda	Probabilidad de pérdida de ráfagas
LAUC	$O(W)$	Horizon _i	Bajo	Alta
LAUC-VF	$O(W \log M)$	S_{ij}, E_{ij}	Alto	Baja
Min-SV/EV	$O(\log M)$	S_{ij}, E_{ij}	Alto	Baja
Best Fit	$O(\log^2 M)$	S_{ij}, E_{ij}	Alto	Baja

Donde:

W = Número de longitudes de onda en cada puerto de salida.

M = Máximo número de ráfagas de datos (o reservaciones) en todos los canales.

Horizon_i = El horizonte del i-ésimo canal de datos.

S_{ij} y E_{ij} = Tiempos de inicio y fin de la j-ésima reservación en el canal i.

A diferencia de los esquemas anteriores basados en ráfagas individuales, existen también algoritmos de planificación por lotes o grupos de ráfagas, como LAW (Look-Ahead Window), planificación en grupo [8], BFCA-VF (Best Fit Channel Allocation with Void Filling), donde se trata básicamente de aprovechar el espacio entre los BHPs (Burst Header Packets) y sus correspondientes ráfagas de datos para formar ventanas de agrupación por *slots* de tiempo, donde los principales desafíos que se enfrentan son la complejidad del proceso y los problemas relacionados con la BLP, que ocurre en la formación del grupo [22]. Finalmente se pueden mencionar alternativas avanzadas con mecanismos de planificación basados en clasificación de flujos que utilizan SDN o árboles de decisión [23] [24].

F. Resolución de contenciones

La contención es la principal causa de pérdidas de ráfagas en redes OBS, y se puede presentar de forma temporal con una naturaleza aleatoria, pero únicamente cuando dos o más ráfagas provenientes de distintos puertos de entrada, están destinadas hacia el mismo canal óptico de un determinado puerto de salida simultáneamente. Por lo tanto, su resolución es un objetivo de diseño de suma importancia debido a que permite reducir la BLP, que es un parámetro crucial en el desempeño de redes OBS debido a que puede degradar las aplicaciones que utilizan este tipo de sistemas (p.ej. TCP podría ir al estado de timeout y múltiples pérdidas de ráfagas conducirían a un throughput muy bajo y a un desperdicio de recursos debido a la retransmisión de paquetes). Al respecto, y debido a que en el dominio óptico no existe aún el equivalente a la memoria RAM electrónica, utilizada en las redes tradicionales de conmutación de paquetes electrónicos para resolver las contenciones mediante el almacenamiento temporal (buffering) de paquetes, varias

investigaciones han conducido a diferentes alternativas para tratar este tema sobre redes OBS, planteando tres métodos conocidos como: deflexión (o desvío), descarte y priorización.

El primer método se puede aplicar en el dominio de: 1) longitud de onda, mediante convertidores para este fin; 2) espacio, a través del desvío por otro puerto, (enrutamiento por deflexión); o 3) tiempo, mediante el retraso durante un período de tiempo usando FDLs (Fiber Delay Line, buffering óptico). En el segundo método, la ráfaga que contiene se descarta si no se puede desviar por falta de disponibilidad de recursos (p.ej. longitud de onda, puerto de salida o FDL). El tercer método hace posible que la ráfaga entrante tenga preferencia sobre una ráfaga existente en función de una prioridad o perfil de tráfico definido. Adicionalmente, es posible utilizar una técnica conocida como segmentación que consiste en dividir la ráfaga entrante o la ráfaga existente en múltiples segmentos, y cada uno luego puede ser desviado, descartado o priorizado. Una posible implementación de este método es definir un segmento como una trama Ethernet, con el fin de utilizar su encabezado y cola para la sincronización y detección de errores, para no requerir ninguna información de control adicional [7] [8].

G. Mecanismos para la recuperación de pérdida de ráfagas

Para el caso en que la contención no se haya podido resolver de forma satisfactoria, inevitablemente se procederá a descartar una de las ráfagas, ante lo cual se tienen dos posibilidades: 1) las capas superiores se encargan de asegurar la fiabilidad de la transmisión (p.ej. el protocolo TCP retransmitiría los segmentos perdidos), con problemas de latencia y degradación de la señal debido a interpretación de falsos estados de congestión; o 2) la propia red OBS proporciona mecanismos para asegurar que los datos no se pierdan, dentro de los cuales se pueden mencionar: retransmisión, FEC (Forward Error Correction) y clonado de ráfagas. En el primer caso, luego del envío del BHP, se duplica y almacenada la ráfaga de datos en el nodo de ingreso antes de transmitirla hacia el core de la red para posibles retransmisiones, donde se utiliza un número de secuencia para identificar cada ráfaga y un mensaje de ARQ (Automatic Retransmission Request) para indicar el fallo de una solicitud de reserva. En el segundo caso se envía información redundante junto con los datos, de manera que, aunque falte una parte de la información, ésta se puede recuperar en su totalidad en el destino. En el tercer caso se replica una ráfaga y se envían copias duplicadas a través de la red de forma simultánea, por lo cual, si la ráfaga original se pierde, la ráfaga clonada tiene la posibilidad de llegar al destino [13].

TABLA III
TESTBEDS DE OBS [2] [25]

Testbed	Año	Hitos	Tecnología de conmutación
ATDnet	2003	Primer <i>testbed</i> de OBS, JIT, tasas de 2.5 Gbps	MEMS
JGN II	2004	Reserva en 2 vías, tasas de 10 Gbps, 6 nodos	MEMS, PLC ^b
NTT	2005	Señalización en 2 vías, enrutamiento por deflexión, distancia 126 km	PLC
Universidad de Tokio	2005	Primer <i>testbed</i> OBS completo, 3 nodos	PLC
BUPT	2005/2007	Implementación de JET/LAUC-VF, soporte multi-QoS, pruebas de TCP sobre OBS e interacción con GMPLS	SOA
Universidad de Essex	2007	OBS sensible a la aplicación	SOA
OITDA	2009	Reserva salto por salto, conmutador muy rápido, reconocimiento de etiqueta óptica, tasas de 10-40 Gbps con conversión de longitud de onda, distancia 92 km	PLZT
Laboratorios/ Corporación NEC de America	2013	Primera demostración de un intra-centro de datos óptico basado en OpenFlow, mediante OFDM y OBS	CAWG ^c

^bPLC (Planar Lightwave Circuit) es un circuito integrado con varios componentes ópticos para satisfacer diferentes funciones complejas, pudiendo ser fabricado en la superficie de algún material policristalino (p.ej. silicio o LiNbO₃) o una plataforma de material anisotrópico [26].

^cCAWG (Cyclic Arrayed Waveguide Grating), denominado también enrutador AWG o intercalador cíclico, es un multiplexor/demultiplexor óptico pasivo que enruta diferentes longitudes de onda desde N puertos de entrada distintos hacia N puertos de salida diferentes de manera cíclica [27].

TABLA IV
STARTUPS Y SUS SOLUCIONES DE OBS [2]

Empresa	Hitos	Solución comercial
Startup Americana <i>Matisse Networks</i>	Pionera en apostar por OBS (2003-2009), enfoque en entornos metropolitanos, tasas de 10- 640 Gbps. Cerró sus operaciones en el año 2009 al no poder conseguir más fondos.	" <i>EtherBurst</i> " con topología anillada, tamaño de ráfagas constante con tecnología sincrónica (<i>slots</i> de tiempo fijos), planificación centralizada, y TL para 10 Gbps en el orden de ns.
Irlandesa <i>Intune Networks</i>	Continuo desarrollo y lanzamiento de su producto (OPST, <i>Optical Packet Switch & Transport</i>) (2009-2011).	" <i>Verisma IVX8000</i> " para anillos metropolitanos, con tecnología asincrónica y TL rápidos.
Huawei	Demostración versión pre-comercial de su producto OBTN y nuevo prototipo PPXC (2011-2012)	OBTN ^d (<i>Optical Burst Transport Network</i>) y PPXC (<i>Petabit per-second Photonic CrossConnect</i>) con una matriz de 80×80.

^dOBTN es una tecnología de conmutación completamente óptica que permite la convergencia de la capa 0 (capa óptica), capa 1 (capa física eléctrica) y capa 2 (capa de enlace), reduciendo la OAM total de una red [28].

H. Demostradores de OBS

OBS ha tenido una gran aceptación en el ámbito de investigación de las tecnologías de comunicaciones ópticas, con más de 2000 artículos presentados en congresos y revistas en los últimos 15 años, donde se ha explorado OBS desde el punto de vista teórico, hasta el desarrollo de prototipos y demostradores (*testbeds*) experimentales en centros de investigación de universidades y empresas de varios países del mundo, que confirman la viabilidad de esta tecnológica [13], siendo los más relevantes los indicados en la Tabla III.

Los intentos por comprobar las diversas arquitecturas y protocolos propuestos para redes OBS, no han quedado únicamente en artículos o experimentos de prueba, sino también han conducido a implementar algunos equipos en versiones pre-comerciales, referidos en la Tabla IV, lo cual se considera un hito tecnológico que ha evidenciado los primeros pasos en cuanto a la viabilidad real de este paradigma, pudiéndose apreciar claramente que OBS va tomando cada vez más fuerza y extendiendo el interés de la comunidad científica y de la industria, en múltiples ámbitos y aplicaciones; aunque aún no existe ningún despliegue real en producción en algún operador.

III.

CONMUTACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS (PERSPECTIVAS FUTURAS)

Los estudios y enfoques más recientes acerca de la tecnología OBS, se han centrado principalmente en los campos de grid computing para aplicaciones distribuidas y servicios colaborativos, problemas de seguridad, SDN y centros de datos ópticos, mencionados a continuación:

A. OBS para aplicaciones distribuidas y servicios colaborativos

En cuanto a este tipo de aplicaciones que emplean el concepto de grid computing, para usuarios científicos, y a la necesidad de ciertos requerimientos específicos de pequeños usuarios, como: colaboración científica de gran escala (p.ej. física de partículas, VLBI Very Long Baseline Interferometry, e-health), colaboración científica de baja escala (p.ej. bioinformática, investigación ambiental), laboratorios virtuales distribuidos (p.ej. instrumentación remota), seguridad y defensa nacional, entornos de aprendizaje personalizado, bibliotecas digitales, y servicios de usuarios de banda ancha en evolución (p.ej. edición de videos/TV interactiva de alta definición, renderizado en tiempo real), entre otros, donde la tecnología OCS actual no provee una solución eficiente, escalable, ni factible por la demanda de enlaces dedicados para cada tipo de aplicación y/o categoría; que por el contrario, requieren de una infraestructura de red flexible para el transporte de grandes

volúmenes de información con una granularidad a nivel de sub-longitud de onda, almacenamiento, procesamiento, y visualización de recursos para una amplia base de usuarios, con tiempos de duración específicos en función de los perfiles de tráfico. Así, OBS resulta ser una alternativa atractiva, donde el uso de elementos conocidos como NPs (Network Processor) son claves para el soporte de funcionalidades requeridas como: soporte de QoS, multicast, y enrutamiento basado en recursos.

En este nuevo esquema (ver Fig. 2), se debe dotar a los nodos de edge con funcionalidades de interfaz que incluye procesos de interoperación entre el usuario y el dominio OBS, referida como G-OUNI (Grid Optical User Network Interface), para la diferenciación y clasificación de tareas computacionales “job” (p.ej. job request, job submission), asignación flexible de recursos, y demás funciones usuales para la transmisión de ráfagas, donde la información de recursos informáticos se podría adaptar junto con los de la capa física (p.ej. requerimientos de ancho de banda) en el BHP, o utilizar el BHP tradicional y el transporte de la información relacionada a la aplicación en el payload de dos ráfagas independientes, con los recursos de red y no de red en la primera, y en la segunda los datos reales a ser procesados remotamente.

Por otro lado, debe extenderse la potencia de procesamiento y funcionalidad del nodo de core para co-asignación y co-reservación de recursos de red y no de red (almacenamiento, procesamiento); además, los protocolos de señalización/reservación deben interactuar con la capa de aplicación para soportar funcionalidades de middleware como: adquisición de información relacionada con los requerimientos, reservación y asignación de recursos, entre otros. El uso de NPs en los nodos de core, permite analizar los datos contenidos dentro de las ráfagas que transitan a través de la red y ejecutar funciones de procesamiento específicas sobre éstos, a la velocidad de la tasa de transmisión (p.ej. algoritmo de descubrimiento de recursos informáticos), además de enrutar los datos en base a las aplicaciones y sus requerimientos de recursos. A diferencia de GUNI, la interfaz de red de recursos para grid GRNI (Grid Resource Network Interface) [29] en los nodos de edge/core, debe realizar procedimientos interoperables entre elementos finales de recursos externos y el dominio OBS, principalmente la propagación del estado de disponibilidad y envío de tareas de recursos locales grid; así como también, el envío al origen de resultados o información de múltiples destinos alternativos [30].

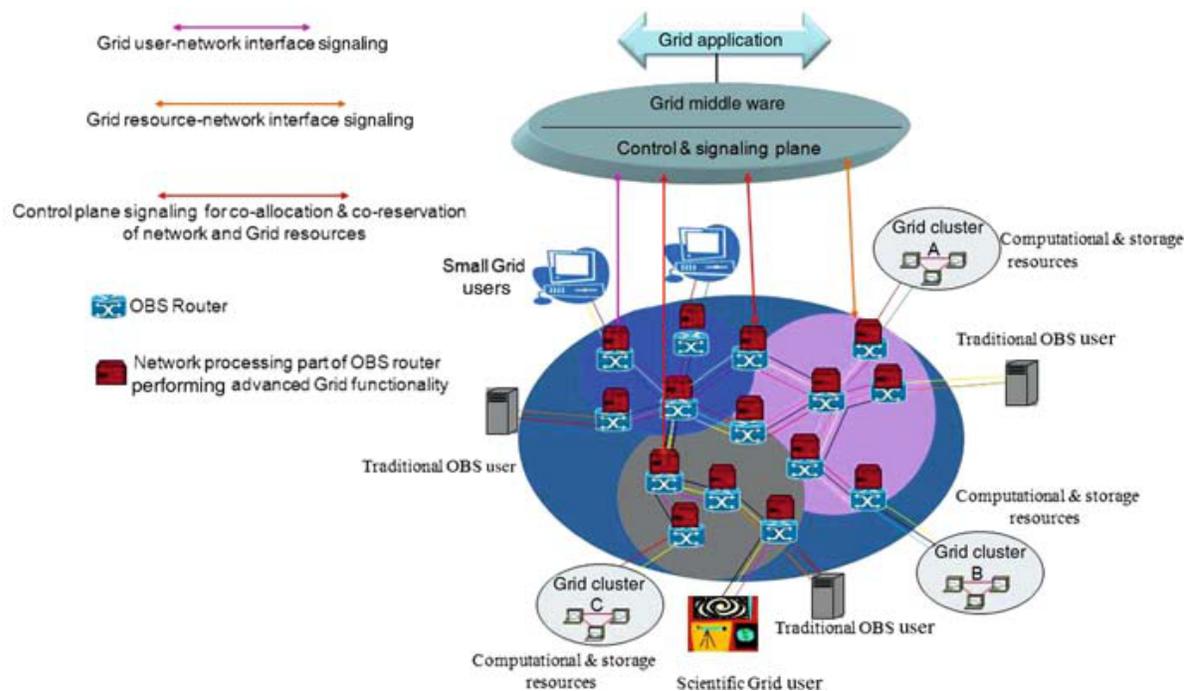


Fig. 2. Arquitectura genérica de una red OBS soportada para grid [30]

En la Tabla V se presenta un resumen de los posibles escenarios de implementación de OBS con soporte para grid computing.

TABLA V
ESCENARIOS E IMPLEMENTACIONES DE OBS PARA GRID-COMPUTING [30]

Escenario	Características	Implementación
<i>Wavelength-Routed (WR-OBS)</i>	Control centralizado (SCU potente). Sobrecarga de <i>overhead</i> para servicios en tiempo real. Escalabilidad limitada.	Híbrida WR-OBS/DWR-OBS. Nodos de <i>edge</i> con interfaces GUNI y GRNI, para administrar todos los recursos <i>grid</i> de la organización virtual (VO) local.
<i>DWR-OBS, Distributed Control (WR-OBS)</i>	Control distribuido, más factible y escalable.	Nodos de <i>core</i> con funcionalidades de la capa <i>grid</i> (p.ej. descubrimiento de recursos y seguridad). Jerarquía en el plano de control para la administración de recursos <i>grid</i> .
<i>Application-aware</i>	Provisión de servicios más rápida y flexible. Descubrimiento de recursos basado en los requerimientos de usuario/aplicación. Soporte de tráfico tradicional/aplicaciones distribuidas.	Señalización mediante JET modificado (ver Fig. 3). Solicitud de usuario/aplicación en ráfagas ópticas activas. Descubrimiento de recursos mediante los enrutadores de <i>core</i> activos, que ejecutan funciones de procesamiento específicas sobre los datos contenidos dentro de una ráfaga activa, a la velocidad de la tasa de transmisión, como: clasificación de requerimientos de red y recursos, clasificación de red y recursos en base a políticas de restricción, establecimiento de vínculos entre requerimientos de recursos clasificados y disponibles [30]. Confirmación o no de recursos al origen y al destino, para el establecimiento de <i>lightpaths</i> y tiempos de duración. Elección del usuario entre recursos disponibles y envío del resultado de la tarea procesada en ráfagas normales (no activas).
<i>Consumer-based</i>	Edición multimedia. Gran número de tareas generadas de tamaño pequeño (pocos megabytes). Tiempo y ubicación de la presentación de tareas altamente impredecible.	Procesamiento y entrega de datos mediante protocolos <i>anycast</i> .

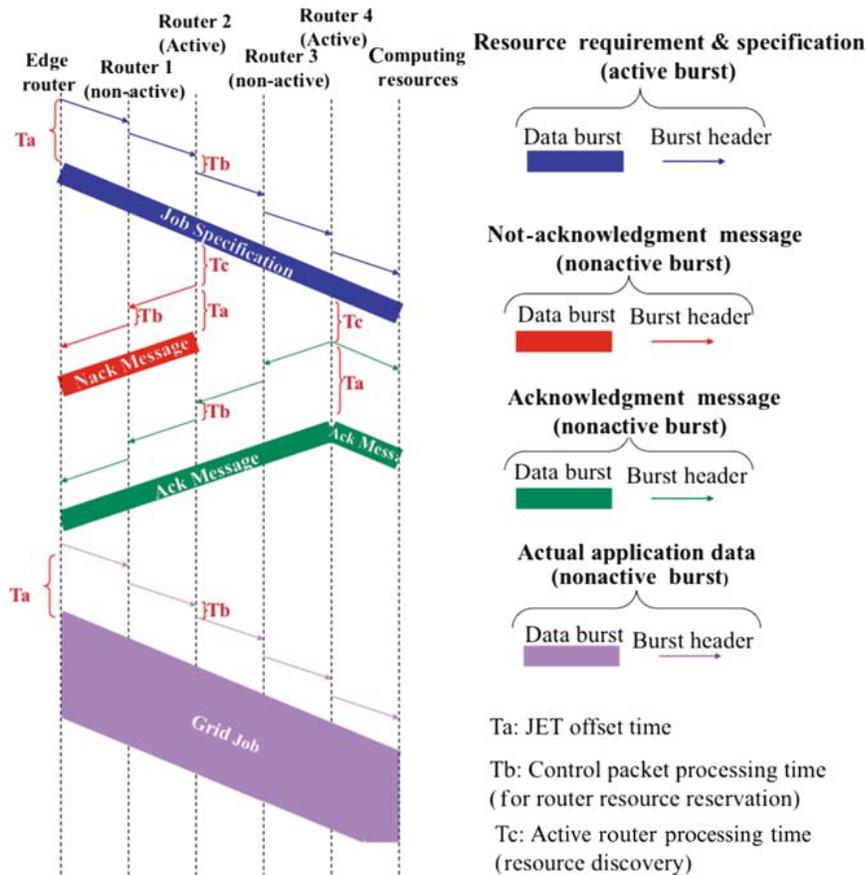


Fig. 3. Procesos de solicitud de recursos y transmisión de datos basados en JET modificado y reservación retardada [30]

B. Problemas de seguridad en redes OBS

Se han realizado algunos estudios sobre los problemas de seguridad en redes OBS, identificando ciertas amenazas como [31] [32] [33]: 1) análisis de tráfico, que extrae la información que está siendo comunicada entre el origen y destino; 2) espionaje “eavesdropping”, similar al anterior pero cambia la capa del ataque; 3) suplantación de identidad “spoofing”, en el que un atacante intenta tener acceso a un sistema usando una identidad falsa; 4) denegación de servicio (Denial of Service, DoS) que prohíbe la comunicación o degrada la calidad del servicio; 5) ataque de redirección de ráfagas (Data Burst Redirection, DBR); 6) ataque de duplicación de ráfagas (Burst Duplication, BD); y 7) inundación “flooding” de BHPs, mencionando particularmente a continuación más detalles sobre los tres últimos, en cuanto a su operación y medidas de seguridad para contrarrestarlos.

En el análisis del ataque DBR [31], se utiliza una solución que equipa a los nodos de privacidad y autenticación usando el algoritmo de cifrado RSA (Rivest-Shamir-Adleman) para encriptar y desencriptar los BHPs, a fin de proteger la red contra de este tipo de ataques, reduciendo el número de BHPs comprometidos.

El análisis efectuado sobre el ataque de BD [32], se basa en la posibilidad de que un enrutador intermedio genere un BHP duplicado y modifique su valor para crear un camino entre el atacante y el nodo comprometido, por lo tanto, la ráfaga que arriba se enviaría tanto al destino como al atacante, comprometiendo su integridad. Como contramedida se proponen dos alternativas: 1) un método de firma digital, creada por el enrutador de ingreso sobre el BHP (en base a las direcciones de origen/destino e ID de la ráfaga), donde cada nodo de core debe verificar si la firma ha sido o no alterada, para descartar o transmitir el BHP; y 2) el uso de un nodo de confianza que en base al registro de los nodos de core, establece un valor de confianza y si es menor que el umbral definido, determina que un nodo está comprometido. El ataque se puede evitar si el nodo de ingreso origen selecciona cada vez una ruta diferente para enviar la ráfaga al nodo egreso de destino, de manera que, aunque el atacante llegase a obtener una ráfaga, no le será de utilidad porque no tendrá la información completa.

En el estudio realizado sobre el ataque de flooding (basado en DoS contra TCP) [33], que consiste en el envío de paquetes BHP maliciosos sin sus correspondientes ráfagas de datos, conduciendo a una reserva de recursos innecesaria, y desencadenando así varios inconvenientes como: baja utilización del ancho de banda, desempeño limitado de la red, alta BLP, y eventualmente problemas de DoS debido a la falta de recursos para las reservas requeridas frente a ráfagas de datos que sean válidas. Como contramedida para bloquear el ataque, se propone un modelo basado en un árbol de decisión que se contrasta con varias técnicas de aprendizaje de máquina (Machine Learning), donde los nodos de core clasifican los

nodos de edge en función de su comportamiento y de los recursos reservados que no están siendo utilizados; concluyendo en que los modelos de árboles de decisión, presentan clasificadores más predictivos en comparación con varios de los algoritmos de aprendizaje de máquina analizados.

C. OBS en centros de datos ópticos

Al igual que las redes de transporte, los centros de datos deben soportar cada vez mayores cargas de trabajo complejas y volúmenes de tráfico, generados en sus servidores y equipos de networking, donde a diferencia de lo que ocurre en las redes de telecomunicaciones, el tráfico de datos en los sistemas informáticos es del 80% a nivel interno y del 20% a nivel externo [11]. Si bien el desarrollo de las tecnologías de paralelismo a nivel de chip y multi-núcleo adoptadas en los equipos informáticos, ha permitido soportar mayores demandas de capacidad computacional (impulsadas por aplicaciones de uso intensivo de datos), y virtualización de alta densidad, los equipos de red empleados en los centros de datos, basados principalmente en circuitos integrados para aplicaciones específicas (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC) e interfaces ópticas que requieren conversiones O/E/O para su funcionamiento, limitan su escalabilidad y viabilidad, con mayor impacto en los centros de datos de gran escala, debido al cuello de botella opto-electrónico, mayores recursos en cuanto a espacio, energía, climatización, etc. Por lo tanto, es evidente una evolución de las tecnologías utilizadas actualmente en este ámbito, donde la fotónica embebida junto con la electrónica, podría dar lugar a un enfoque híbrido que aproveche las ventajas de ambos mundos para la fabricación de tarjetas opto-electrónicas (OE-PCB, Optical-Electrical Printed Circuit Board), a fin de superar dichas limitaciones con una relación costo-beneficio mucho mayor [11].

En adición a lo anterior, y en vista de que en la práctica los centros de datos se dimensionan con una relación de sobresuscripción de 1:4 - 1:10, limitando principalmente la capacidad de conmutación y transmisión de los segmentos entre racks/clusters, debido a la alta densidad de puertos requeridos y a etapas en cascada involucradas, se han investigado en los últimos años, la adaptación de las tecnologías OCS, OBS y OPS dentro de este ámbito. Es así que, la tecnología OCS se ha probado en experimentos recientes en intra-centros de datos, por todas las mejoras y ventajas que presenta en comparación con el esquema tradicional de networking en el dominio electrónico, evidenciando una evolución inminente hacia el manejo de flujos de datos a nivel completamente óptico [11]. Otros experimentos realizados se han basado también en OBS, y dentro del contexto de los esquemas de conmutación óptica, las tecnologías SDN y NFV (Network Function Virtualization) se visualizan como factores clave para integrar un control coordinado de recursos y asignación flexible de capacidad en la red [11]. En la Tabla VI se presenta un resumen de los estudios realizados con relación a la tecnología OBS.

TABLA VI
PROPUESTAS PARA CENTROS DE DATOS ÓPTICOS BASADAS EN OBS [2]

Arquitectura	Características	Ventajas y desventajas
OBS con conmutadores rápidos	<i>Switches ToR (Top off Rack)</i> en el <i>edge</i> y conmutadores ópticos rápidos en el <i>core</i> . Reserva bidireccional. ToR conectado a cada conmutador en topología de un salto.	BLP cero con ligero incremento de latencia. Escalabilidad limitada. Complejidad en plano de control.
Anillos OBS	<i>edge</i> tráfico más estacionario y <i>core</i> con naturaleza a ráfagas.	Alto ancho de banda. Gran interconectividad (>1000 puntos de entrega). Tiempo de reconfiguración < OCS.
HOS (<i>Hybrid Optical Switching</i>)	Conmutación óptica híbrida (con etiqueta óptica para ráfagas). Topología tradicional de 3 niveles. MEMS 3D para OCS y ráfagas grandes. SOA para paquetes/ráfagas.	BLP y latencia baja. Desafío práctico para red a gran escala.
HOSA (<i>Hybrid Optical Switching Architecture</i>)	Conmutación óptica híbrida. Ensamblado/desensamblado en un nuevo ToR.	Latencia y consumo de energía bajos, alto rendimiento. Gran cantidad de puertos sobre una red de una sola etapa.
TORUS	Basado en OBS/OPS, topología plana con enrutadores opto-electrónicos híbridos (HOPR, <i>Hybrid Optoelectronic Router</i>) conectados a los ToR. Conmutadores rápidos EAM (B&S) y control en basado en <i>OpenFlow</i> (ver Fig. 4).	Escalabilidad superior y conectividad robusta.
LIGHTNESS	Uso de OCS/OPS. SOA (B&S) para OPS. Plano de datos programable mediante control SDN unificado. Controlador local de OPS mediante etiquetas ópticas (ver Fig. 5).	Utilización eficiente del ancho de banda. <i>Backplane</i> con arquitectura bajo demanda (<i>Architecture on Demand</i>), AoD). Escalabilidad intra/inter cluster mediante AoD.

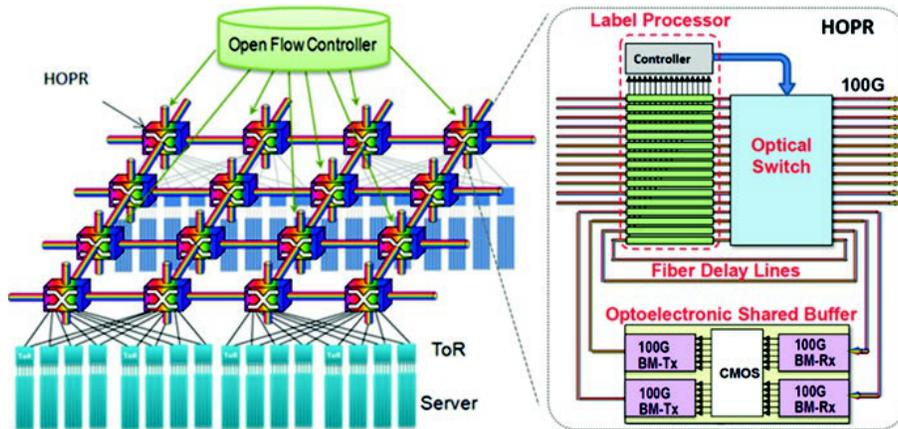


Fig. 4. Arquitectura TORUS que emplea enrutadores opto-electrónicos (HOPRs) [11]

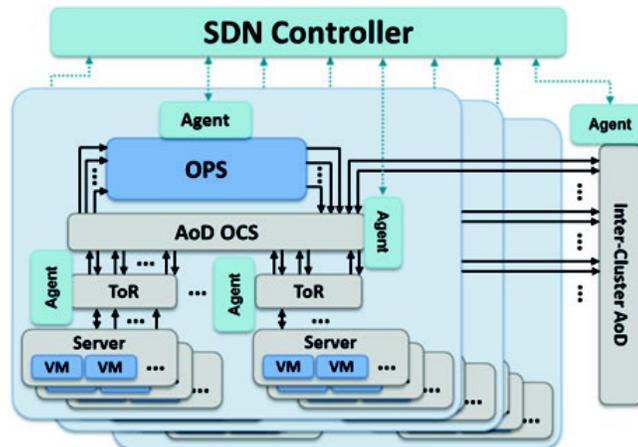


Fig. 5. Arquitectura para red de centro de datos LIGHTNESS [11]

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando que la electrónica está llegando cada vez más cerca de la barrera física en términos de la miniaturización de sus componentes, la investigación y el desarrollo de dispositivos, y técnicas de conmutación fotónica cobra mayor relevancia a cada instante, donde la comunidad científica tiene un gran reto y un importante camino por recorrer todavía, para lograr los primeros pasos que puedan dar surgimiento al Internet óptico de nueva generación.

La constante demanda de servicios y aplicaciones tanto actuales como emergentes y futuros, requiere indudablemente una evolución de las redes ópticas existentes, donde las nuevas tecnologías de conmutación óptica tendrán un papel crucial en el transporte de grandes volúmenes de información a nivel completamente óptico a través de técnicas de multiplexación estadística, tanto en las comunicaciones que se llevan a cabo dentro de los centros de datos como en los segmentos de transporte que los interconectan, pudiéndose visualizar un nuevo ecosistema opto-electrónico, donde OBS se podría considerar como una alternativa candidata a una solución inicial para el Internet óptico de nueva generación en el corto y mediano plazo, mientras se alcanza un desarrollo y grado de madurez en el paradigma de OPS, que podría lograrse en el largo plazo.

Existe una relación de compromiso entre los distintos parámetros de una red OBS, como el tiempo de ensamblado/tamaño de ráfaga y retardo/pérdida de ráfagas, señalización/complejidad de planificación y performance, entre otras, que pueden impactar en el desempeño total del sistema, y por lo tanto se deben considerar en la etapa de diseño para conseguir un comportamiento óptimo.

El desarrollo exitoso que pueda tener OBS depende de una serie de tecnologías habilitantes y nuevos algoritmos/funcionalidades que han sido evaluados en entornos de simulación y laboratorio, e incluso en prototipos de versiones pre-comerciales, que se consideran un hito tecnológico que ha evidenciado los primeros pasos de este paradigma, como una solución técnicamente realizable teniendo en cuenta el grado de madurez de la tecnología actual, dado sus requerimientos moderados de operación.

La tecnología OBS ha sido ampliamente estudiada y evaluada en múltiples ámbitos de aplicación, con expectativas interesantes; sin embargo, para una implementación en un entorno real por parte de los fabricantes de equipos, se requeriría la introducción y posterior estandarización de nuevos protocolos principalmente del stack TCP/IP, que se adapten de mejor forma a esta posible solución, de manera que se la pueda introducir paulatinamente como proyectos piloto, para evaluar su potencial, y aprovechar el momento en despliegues de nueva infraestructura o reemplazo de equipamiento por obsolescencia.

Con la adopción cada vez mayor de arquitecturas de administración y control basadas en SDN, se puede pensar también en un esquema inicial híbrido que conserve las tecnologías actuales para el tráfico que requiere OCS o ráfagas grandes, complementado con la capa de OBS para el tráfico de ráfagas de menor tamaño, donde los principales desafíos seguirán siendo las exigencias de conmutación para altas

capacidades, la resolución de contenciones y el nivel de escalabilidad, a costos razonables y accesibles.

La tecnología de conmutación en redes ópticas está llegando cada vez más a un punto de inflexión, y a pesar de los grandes esfuerzos de los fabricantes de equipos para lograr adaptar las redes con capacidades de flexibilidad, dinamicidad y autonomía para satisfacer los diferentes perfiles de tráfico, se evidencia una mayor necesidad de abandonar las tecnologías actuales en favor de nuevos paradigmas como OBS, que con seguridad permitirá optimizar el uso de los recursos con un mayor aprovechamiento de la capacidad, a una relación costo beneficio más alta.

Con el advenimiento de tecnologías emergentes como SDN, blockchain, 5G, IoT, Inteligencia Artificial, Machine Learning, etc., y nuevas aplicaciones que se puedan derivar del uso de bigdata, Web 3.0, Web 4.0, computación cuántica, computación cognitiva, etc. que utilizan las redes como plataforma para la comunicación, se podría imaginar como expectativas futuras, una arquitectura de red óptica modular definida por software, con capacidades de aprendizaje automático, que permita identificar diferentes perfiles y requerimientos de tráfico para su tratamiento y transmisión, donde los siguientes pasos del networking óptico son cada vez más requeridos. En este sentido, se deja abierta la posibilidad de incursionar más en la adaptación de las redes OBS y los diferentes componentes y aspectos mencionados en el presente artículo, para extender su estudio en trabajos futuros.

Debido a la inmadurez de la tecnología óptica actual, la introducción de OBS requiere la adaptación e interacción entre los dominios eléctrico y óptico para su funcionalidad, donde la nueva estructura de transmisión de ráfagas tiene ciertas implicaciones en cuanto al tratamiento y manejo del tráfico, que requiere cambios importantes en diversos componentes como láseres, receptores, conmutadores ópticos, compensadores de dispersión, esquemas de buffering, etc., en relación con los implementados en los sistemas existentes, así como también el soporte de nuevos protocolos para el transporte del tráfico de datos, por lo cual se recomienda considerar todas estas aristas y relaciones de compromiso que se pueden derivar, a fin de consolidar una solución integral, que pueda ir reemplazando paulatinamente en un futuro cercano, el ecosistema de red interconectado existente.

Puesto que la tecnología OBS se visualiza como una alternativa predecesora a OPS, se recomienda tener en cuenta durante su diseño, los componentes y mecanismos óptimos, que posteriormente permitan escalar con cambios menores o moderados hacia OPS.

REFERENCIAS

- [1] Barradas, Á. de M. P. do, y de Lima, N. (2009). Quality of service in optical burst switching networks.
- [2] Venegas, A. (2017). *Estudio y Evaluación del Desempeño de TCP sobre Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, Optical Burst Switching) mediante un Prototipo basado en Simulación*. (Maestría). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- [3] Zyskind, J., y Srivastava, A. (2011). *Optically amplified WDM networks*. USA: Academic press

- [4] Alzate, D. F., y Cárdenas, A. (2011). Retos en la transmisión de 40/100 Gb/s sobre fibra óptica. *Revista en telecomunicaciones e informática*, 1(2).
- [5] Torres, J. J. G., Soto, A. M. C., y González, N. G. (2015). Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones. *Respuestas*, 20(2), 6–22.
- [6] Turner, J. S. (1999). Terabit burst switching. *Journal of High Speed Networks*, 8(1), 3–16.
- [7] Chen, Y., Qiao, C., y Yu, X. (2004). Optical burst switching (OBS): A new area in optical networking research. *IEEE network*, 18(3), 16–23.
- [8] Jue, J. P., y Vokkarane, V. M. (2006). *Optical burst switched networks*. New York, USA: Springer Science + Business Media.
- [9] Battestilli, T., y Perros, H. (2004). Optical burst switching for the next generation Internet. *IEEE Potentials*, 23(5), 40–43.
- [10] Venkatesh, T., y Murthy, C. S. R. (2010). *An analytical approach to optical burst switched networks* (Vol. 2010). New York: Springer.
- [11] Testa, F., y Pavesi, L. (2018). *Optical Switching in Next Generation Data Centers*. Springer.
- [12] Ohashi, T., Hosaka, H., y Morita, T. (2010). Light transmittance memory effect of ferroelectric materials induced by electrical imprint field. En *Service Robotics and Mechatronics* (pp. 363–366). Springer.
- [13] González de Dios, Ó. (2012). *Rendimiento de TCP y Cálculo de Rutas en Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas* (Doctorado). Universidad de Valladolid.
- [14] Hossain, A. D., y Hossain, M. (2018). Burst mode optical receiver with 10 ns lock time based on concurrent DC offset and timing recovery technique. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 10(2), 65–78.
- [15] Rylyakov, A., Proesel, J. E., Rylov, S., Lee, B. G., Bulzacchelli, J. F., Ardey, A., ... Schow, C. L. (2015). A 25 Gb/s burst-mode receiver for low latency photonic switch networks. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50(12), 3120–3132.
- [16] Yoo, S., Lee, J. K., y Kim, K. (2017). Fast tunable laser assembly and burst mode receiver for photonic switched optical network. En *Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2017 International Conference on* (pp. 1241–1243). IEEE.
- [17] Willner A (2003) Optical burst switching (OBS): issues in the physical layer. In: Proceedings of IEEE international workshop on optical burst switching, co-located with IEEE global communications conference (GLOBECOM), Dallas, TX.
- [18] Yayah, A. A., Ismail, A. S., y Coulbaly, Y. (2015). A Review Burst Assembly Techniques in Optical Burst Switching (OBS). *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 73(2), 1–6.
- [19] Sansò, B., Vázquez-Abad, F., y Gutiérrez-Cabrera, E. (2005). S-JET: efficient reservation scheduling algorithm for optical burst switches. *Journal of Optical Networking*, 4(8), 476–498.
- [20] El Houmaidi, M. (2005). *Resource allocation schemes and performance evaluation models for wavelength division multiplexed optical networks*. (Doctorado). University of Central Florida.
- [21] Xu, J., Qiao, C., Li, J., y Xu, G. (2003). Efficient channel scheduling algorithms in optical burst switched networks. En *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. IEEE Societies (Vol. 3, pp. 2268–2278). IEEE.
- [22] Tavanam, V. R., Bhandari, B. N., y Dasari, K. S. (2017). Deterministic batch scheduling algorithm for optimal channel utilization in optical burst switching networks. En *Region 10 Conference, TENCON 2017-2017 IEEE* (pp. 3141–3146). IEEE.
- [23] Tang, W., Chen, F., Chen, M., y Liu, G. (2016). Flow Scheduling in OBS Networks Based on Software-Defined Networking Control Plane. *KSI Transactions on Internet & Information Systems*, 10(1).
- [24] Wang, C., Cao, H., Yang, S., Guo, J., Guo, H., y Wu, J. (2018). Decision Tree Classification based Mix-flows scheduling in Optical Switched DCNs. En *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)* (pp. 1–3). IEEE.
- [25] Ji, P. N., Qian, D., Sethuraman, K., Hu, J., Aono, Y., Tajima, T., ... Wellbrock, G. A. (2013). First demonstration of real-time all-optical software-defined intra-data center star network using OFDM and burst switching. *2013 18th OptoElectronics and Communications Conference held jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS)*, 1-2.
- [26] Binh, L. N. (2018). *Optical Modulation: Advanced Techniques and Applications in Transmission Systems and Networks*. Taylor & Francis, a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T & F Informa, plc. Boca Raton: CRC Press.
- [27] Kachris, C., Bergman, K., y Tomkos, I. (2012). *Optical interconnects for future data center networks*. New York: Springer Science + Business Media.
- [28] Huawei Demonstrates OBTN Prototype at OFC/NFOEC 2011. (2011, marzo 7). Obtenido de: <https://www.businesswire.com/news/home/20110307005644/en/Huawei-Demonstrates-OBTN-Prototype-OFCNFOEC-2011>. (Octubre, 2018).
- [29] Simeonidou, D., Nejabati, R., Ciulli, N., Battestilli, L., Carrozzo, G., Castoldi, P., ... Ji, Y. F. (2005). Grid optical burst switched networks (GOBS). En *Global Grid Forum Draft*.
- [30] Aracil, J., y Callegati, F. (2009). *Enabling optical internet with advanced network technologies*. London: Springer Science + Business Media.
- [31] Kesar, P., y Mandeep, K. S. (2017). Security issues in the optical burst Switched network: a review. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 6(3), 255–260.
- [32] Coulbaly, Y., Al-Kilany, A. A. I., Latiff, M. S. A., Rouskas, G., Mandala, S., & Razzaque, M. A. (2015, April). Secure burst control packet scheme for Optical Burst Switching networks. In 2015 IEEE International Broadband and Photonics Conference (IBP) (pp. 86-91). IEEE.
- [33] Rajab, A. D. A. (2017). *A Machine Learning Approach for Enhancing Security and Quality of Service of Optical Burst Switching Networks* (PhD Thesis). University of South Carolina.



Antonio Venegas López Ingeniero Electrónico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito Ecuador. Magister en Redes de Comunicaciones de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Con más de 15 años de experiencia en el sector de Telecomunicaciones, ha trabajado en varias empresas públicas y privadas de la industria, aparte de dedicarse a la docencia universitaria en las Facultades de Ingeniería Electrónica (hoy Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones) e Ingeniería en Sistemas (hoy Departamento de Ciencias de la Computación) en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y en la Facultad de Ingeniería en Sistemas y Computación de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Su campo de interés son las Comunicaciones Ópticas, y las TICs en general.



María Soledad Jiménez Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional. Master of Science in Electrical Engineering, Universidad de Texas & Arlington – USA.

Docente a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. Su campo de interés son las Comunicaciones Ópticas.



Paola Venegas López Ingeniera en Electrónica y telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito Ecuador. Magister en Redes de Comunicaciones de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Magister en Administración de Empresas con mención en Gerencia de la Calidad y Productividad de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Con más de 8 años de experiencia en el sector de Telecomunicaciones, ha trabajado en varias empresas públicas y privadas de la industria, aparte de dedicarse a la docencia universitaria en la carrera de telecomunicaciones en la Universidad de las Américas UDLA, y en la Facultad de Ingeniería en Sistemas y Computación de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Su campo de interés son la Regulación de las Telecomunicaciones, y las TICs en general.

