

Redes ópticas modernas

Capítulo 1: Análisis de las tendencias focalizadas en los centros de datos; una revisión de la evolución del plano de control de redes ópticas.

<https://doi.org/10.47460/uct.v26i113.583>



Redes ópticas modernas

Capítulo 1: Análisis de las tendencias focalizadas en los centros de datos; una revisión de la evolución del plano de control de redes ópticas.

ISBN: 978-9942-40-966-9

Edición: Primera.

Editorial: AutanaBooks

Fecha de Publicación: junio de 2022

Autores: Manuel Ramírez Pérez, Asencio Alejandro Huaita Bedregal

ISBN: 978-9942-40-966-9



INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

**Manuel Ramírez Pérez**

Ingeniero en tecnología para la construcción de maquinaria, Master en Tecnología de la Información y las Comunicaciones para la educación, Universidad Central de las Villas, Cuba, (2000) Diplomado en Sociedad de la Información y las Comunicaciones (2001) Profesor adjunto de la Universidad Central de las Villas (2004-2008). Cursos de CCNA de la academia Cisco en Routing and Switching.

Universidad ECOTEC-Samborondon Guayaquil, Ecuador

mramirez@ecotec.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9603-478X>

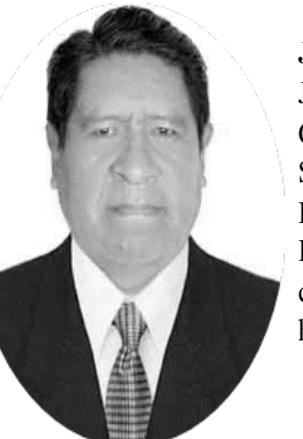
**Asencio Alejandro Huaita Bedregal**

Huaita Bedregal, Asencio Alejandro. Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones. Doctor en Ingeniería Mecatrónica. Docente en el programa de estudios de Ingeniería Electrónica y docente investigador de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú

ahuaita@unsa.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-2819-1745>

**Javier Mamani Ceferino Hilario**

Javier Mamani, Ceferino Hilario. Doctor en Ciencias: Educación. Maestro en Ciencias: Educación con mención en Gestión y Administración Educativa. Segunda Especialidad en Ingeniería Informática. Docente investigador del Instituto Superior Pedro P. Díaz, Arequipa, Perú.

IEST "Pedro P. Díaz"

ceferinojavier@iestp-ppd.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-5563-2166>

PRÓLOGO

Las redes ópticas han experimentado cambios importantes en muchos aspectos en los últimos años. Entre ellos está la manera de controlar y gestionar sus recursos. En este capítulo se realizó una aproximación histórica al desarrollo del plano de control de estas redes y los métodos que emplearon para alcanzar una mayor rapidez y eficiencia en el enrutamiento de información y los métodos que se están investigando para aumentar su rendimiento. Para ello se partió de la evolución del plano de control de las redes ópticas conmutadas por longitud de onda (Wavelength Switched Optical Networks, WSON), pasando por las redes ópticas elásticas (Elastic Optical Networks, EON) y las redes multicapa (Multilayer) que manejan protocolos IP y ópticos a la vez. En ellas se aprecia el paso de modelos estáticos de control y gestión basados en procedimientos manuales y de hardware, hasta modelos dinámicos basados en software donde se separan las acciones del plano de gestión de la red, de las encargadas de reglamentar la conmutación de datos. Esta separación se conoce como el paradigma de las redes definidas por software (Software Defined Network, SDN). Por último, y bajo este último paradigma se enfocan los problemas y las soluciones que se están desarrollando para las nuevas arquitecturas adaptadas a los centros ópticos de datos.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque la posibilidad de transmitir información mediante luz se venía implementando desde mediados de los años 80, fue a partir de la década de los 90 cuando la masificación del computador personal, la telefonía celular y la irrupción de Internet, por nombrar sólo algunas de las razones más destacadas, provocaron una demanda exponencial, no solo de acceso a los datos de aplicaciones, audios, videos, entre otros, sino también de medios que pudiesen gestionar y transportar un cada vez mayor volumen de información. Dada la presencia de esta necesidad, se requirió el desarrollo de nuevas tecnologías que pudiesen dar respuestas a las exigencias antes expresadas. Una de ellas fue la implementación de redes ópticas que ofreciesen un mayor ancho de banda a los usuarios [1].

Uno de los principales inconvenientes, que presentaron las primeras implementaciones de redes ópticas y los centros de datos ópticos, fue no contar con los equipos y elementos equivalentes a los dispositivos y elementos presentes en las redes de datos tradicionales, como procesadores o memorias en su equivalente óptico; esto supuso la necesidad de realizar conversiones de señal entre nodos y entre equipos. Cuando una señal óptica llegaba a la interfaz de entrada de un nodo, esta debía ser acondicionada y convertida en una señal eléctrica (conversión opto-eléctrica, OE), para que pudiese ser gestionada, controlada y luego transportada a la interfaz de destino. Una vez colocada la señal en la interfaz correspondiente de salida debía ser transformada nuevamente a una señal óptica (conversión electro-óptica, EO) para lograr que de esta manera pudiese seguir hasta su lugar de destino. Esta situación provocaba que las comunicaciones ópticas no aprovecharan al máximo su potencial en ancho de banda, creando encolamiento de datos en las interfaces y por tanto la necesidad de contener adecuadamente los requerimientos de entrada, introduciendo en la red los subsecuentes problemas de latencia. Esto motivó a las empresas y a los investigadores a desarrollar soluciones tanto a nivel de administración como de equipos físicos que eliminaran los embotellamientos causados por las conversiones que se debían aplicar a la señal. Estas soluciones pasaban por mantener la señal lumínica en el dominio óptico y de esa manera eliminar la necesidad de conversiones, mejorando la velocidad y eficiencia de la red [2] [3].

Partiendo de este escenario, este trabajo muestra cómo han progresado los procedimientos de gestión y control de las redes ópticas durante los últimos veinte años y los avances que se abren con las más recientes investigaciones que pueden implementarse en los centros de datos.

El capítulo se organiza desde esta primera sección introductoria a los temas a tratar en los subsiguientes apartados; una segunda sección donde se muestra la metodología seguida, reflejando en ella aquellos elementos que se tomaron en cuenta en la investigación y los objetivos que se pretenden alcanzar. En la tercera sección se desarrollan aquellos conceptos que nos servirán para comprender el análisis posterior sobre los requerimientos de los centros ópticos de datos y las investigaciones que se han realizado para la optimización de su desempeño. En la cuarta sección se abordan los sistemas de control para las redes de datos y su estado de avance en las nuevas tendencias. Las secciones cinco y seis se tratan las redes SDN y de centros de datos. En la sección 7 se resaltan los aspectos más destacados obtenidos de la investigación y por último se desarrollan conclusiones sobre los avances actuales en los centros ópticos de datos.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del capítulo se escogió una aproximación de las redes ópticas, describiendo los elementos

del plano de control más importantes que le caracterizan, desde las diferentes etapas de desarrollo hasta llegar a los avances más recientes obtenidos, enfocados en las necesidades de crecimiento de los centros de datos (Data Centers) y las investigaciones más recientes en esta dirección. El objetivo es contrastar las líneas de investigación con su importancia en el corto plazo.

La metodología estuvo centrada en una revisión exhaustiva de la información, con especial atención a publicaciones científicas de revistas indexadas, que son fuentes confiables para el registro de la información bibliográfica.

3. DESARROLLO HISTÓRICO LAS REDES DE DATOS ÓPTICAS

El uso de la fibra óptica supuso el comienzo de toda una revolución en la forma de transmitir datos de un lugar a otro. La primera ventaja de este medio fue, como se mencionó anteriormente, el aumento de la capacidad de ancho de banda para la transmisión de datos. Esto permitió que la comunicación entre dos puntos o nodos al utilizar caminos de luz fuese mucho más rápida [4]. La evolución del uso de fibra óptica puede resumirse de la siguiente manera

-Período 1977 – 1995

Corresponde a los primeros intentos ejecutados para extender conexiones de fibra óptica como medio de transporte de datos. Estas primeras redes WSON utilizaron transeceptores que funcionaban mediante el principio de regeneración opto-eléctrica, creando pulsos de luz entre el emisor y el receptor de manera rápida y automática. Sin embargo, la tasa de bits neta que podían manejar en sus interfaces no sobrepasó los 2,5 Gb/s en este período. Eso se debió a un conjunto de problemas presentes en la época: un número limitado de longitudes de onda por enlace que se podían manejar, las limitaciones en la longitud de los cables y la configuración de los puntos de emisión y recepción. Todas ellas repercutieron en las decisiones de enrutamiento asociadas a las longitudes de ondas a emplear [5].

-Período 1995 – 2008

Se caracteriza por la introducción de los amplificadores ópticos en la gestión de redes. Esto permitió la manipulación y transmisión bidireccional de diferentes señales sobre el mismo enlace mediante la técnica de multiplexación. Esto ayudó a la adopción de los estándares de multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) como el multiplexado denso por división de longitud de onda (Dense Wavelength Division Multiplexing DWDM) y la multiplexación por división aproximada de longitud de onda (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM). En estos sistemas se requería un continuo manejo de errores por lo que la puesta a punto pasó de ser un ejercicio manual de depuración de errores a un modelo de verificación continua del canal, lo que llevó al control mediante la monitorización de los parámetros de físicos de la red óptica [6].

-2008 – presente

Se introduce en los ambientes comerciales y de investigación los sistemas coherentes amplificados, que fueron posibles gracias al descubrimiento de la pre-compensación de la dispersión en el medio óptico. Esto propició la llegada de las redes ópticas elásticas EON, que al utilizar equipos de recepción/transmisión coherentes permitieron herramientas para conocer el estado físico de extremo a extremo de un enlace óptico mediante el cálculo de la tasa de error de bits en el medio (BER, Bit Error Rate) y de la relación entre el ruido presente en el medio y la señal en el mismo, conocido como la relación señal/ruido OSRN (Optical Signal to Noise Ratio) [7].

-Tendencias: investigación activa en la ampliación de capacidad de transferencia

Se trabaja en la ampliación de las capacidades de transporte de datos mediante la investigación de los canales de transmisión más allá de la banda C de frecuencias [8], exploración de la capacidad de multiplexación de señales mediante la manipulación del momento orbital de la luz (Orbital angular momentum (OAM) multiplexing) y multiplexación espacial [9].

3.1 El plano de gestión y el plano de control en una red óptica

En este sentido se debe aclarar que, cuando se hace referencia a los planos de gestión o de control en las redes óptica de datos, en realidad se hace referencia al conjunto de funciones que deben ejecutarse para mantener a la red operativa. Entonces las actividades que deben ejecutarse en el plano de gestión corresponden con las funciones exclusivas de un nivel administrativo general, y las actividades asociadas al plano de control corresponden a las

funciones ejecutadas para el correcto enrutamiento de los datos. Entonces para distinguir cuáles actividades se ejecutan en el plano de gestión y cuáles pertenecen al plano de control se necesita definir las.

El plano de gestión se encarga de la supervisión y coordinación de los elementos que componen la red de tal manera que su infraestructura en conjunto funcione de forma óptima según lo esperado por los usuarios. Para ello la capa de gestión debe encargarse de planificar, configurar e instalar los recursos necesarios para el correcto funcionamiento de la red. A medida que aumenta la complejidad de las redes, la gestión de las mismas suele requerir de subniveles de gestión que se encarguen de aspectos como la seguridad, la configuración, el manejo de fallas, el desempeño de la red, entre otros, que se encuentran asociados a áreas o grupos de gestión como pueden ser la red, los departamentos administrativos y de negocios, operaciones, etc. La gestión de la red ha evolucionado desde un manejo centralizado, donde las configuraciones se realizaban de forma manual por los administradores de la red, a la automatización avanzada de procesos mediante la implementación de aprendizaje automático, entre otras técnicas [10].

El plano de control se encarga de las reglas y protocolos de enrutamiento de los paquetes de datos que se generan o llegan a la red, para ello necesita conocer qué tipo de paquete necesita enrutar, cuál ruta debe seguir y por cuál interfaz será enviado. Entonces el plano de control se encarga de todos aquellos aspectos asociados a los protocolos de conexión de los datos, esto engloba el descubrimiento de la red, su topología y la señalización de ruta. El plano de control, aprovechando los protocolos de enrutamiento existentes, que calculan las rutas principales y de reserva entre otras actividades, se encuentra de por sí automatizado, por tanto, la administración humana se encuentra limitada a casos de configuración inicial o eventualidades en la topología física de la red.

Al elevarse la demanda de conexiones en las redes ópticas, se hizo inviable el mantenimiento estático de rutas. Por lo que fue necesario abordar el problema de la baja disponibilidad de conexiones mediante una aproximación dinámica. Esto requirió trasladar el descubrimiento de servicios y recursos a los elementos de red, permitiendo a los mismos el acceso a la topología de la red y a la ubicación de los recursos presentes en ella, lo que facilitó el establecimiento de rutas ópticas optimizadas de forma autónoma, logrando una conmutación de conexiones más eficiente. De esta manera se pasó de rutas estáticas que requerían de una configuración constante, a rutas que se creaban de manera automática según un algoritmo de cálculo. Esto supuso un avance enorme en la eficiencia de la red. Ahora, según el tipo de requerimiento que se hacía a la red, el plano de control podía encargarse de manera autónoma del cálculo de la ruta y de la señalización necesaria que llevaría los datos a su destino. Puede notarse entonces que el plano de gestión queda libre de estas funciones, o no necesariamente debe estar presente en el establecimiento de las conexiones.

En este punto es necesario identificar los protocolos que han regido el funcionamiento del plano de control en las redes ópticas partiendo de los protocolos que permitieron a cada etapa de desarrollo de las redes ópticas cumplir con los requerimientos de conexión de la época, y como se podrá observar a continuación, la adopción y desarrollo de protocolos fue liderado por los diferentes entes de estandarización existente. Para la Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (Internet Engineering Task Force, IETF) el plano de control óptico se rigió para las primeras redes ópticas bajo el estándar conocido como conmutación de etiquetas multiprotocolo generalizada (Generalized Multi- Protocol Label Switching, GMPLS). Para Unión Internacional de telecomunicaciones (ITU-T) el plano de control óptico sigue el protocolo denominado red óptica conmutada automáticamente (Automatically Switched Optical Network, ASON). En la Figura 1 se presenta un esquema de los niveles de gestión, control y datos para redes ópticas ASON con sus elementos característicos (interfaces de usuario UNI, los controladores de conexión óptica OCC, interfaces entre redes NNI, de capa de transporte NMI-T, del plano de control NMI-A, e interfaces físicas PI). Es importante destacar que, mientras ITU-T se encarga de definir cómo debería ser la arquitectura del plano de control, la IETF se ha enfocado en desarrollar los protocolos que cumplan con el trabajo del plano de control. Con la llegada de las redes definidas por software SDN, y la subsecuente separación entre el plano de control y el plano de gestión, los paradigmas en lo que respecta a la construcción de estándares para los planos de control y gestión cambiaron totalmente [11].

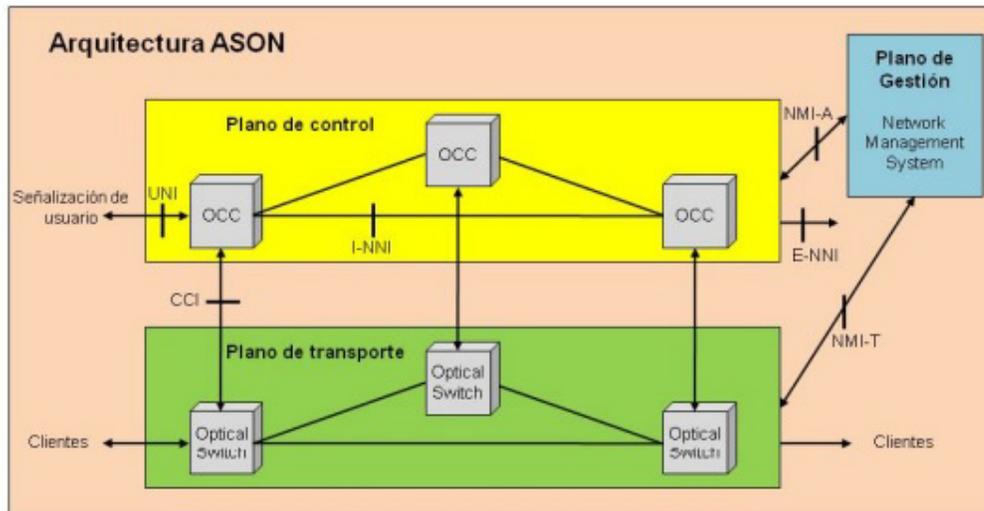


Fig. 1. Configuración ASON [12]

3.2 Redes ópticas conmutadas de tipo WSON

Las redes ópticas conmutadas por longitud de onda WSON fueron posibles cuando la técnica de multiplexación de varias longitudes de ondas (Wavelength Division Multiplexing, WDM), fue desarrollada. WDM hace la interconexión óptica (Optical cross-connect, OXC) mediante un conjunto de decenas de canales de longitud de onda, que poseen una velocidad de transmisión ubicada entre los 10 o 40 Gbit / s como tasa promedio. El acoplador óptico permitió que varias longitudes de onda pudiesen tener acceso al canal óptico, como puede verse referencialmente en la Figura 2. De esta manera fue posible enviar por un mismo canal diferentes flujos de datos tales como IP, Ethernet, SDH entre otros, mediante un mismo medio. En un principio se siguió utilizando un enfoque manual centralizado en los operadores de red para el control del tráfico de datos enrutado en las redes de tipo WSON. Sin embargo, con la adopción del protocolo GMPLS para el cálculo de rutas dinámicas, las redes ópticas WSON ganaron en eficiencia y rapidez. El uso de etiquetado generalizado para rutas conmutadas (Generalized Label Switched Paths: G-LSP) permitió el control tanto de redes ASON como de otras tecnologías en nivel de transporte de datos, apuntalando el desarrollo de las primeras redes WSON [7].

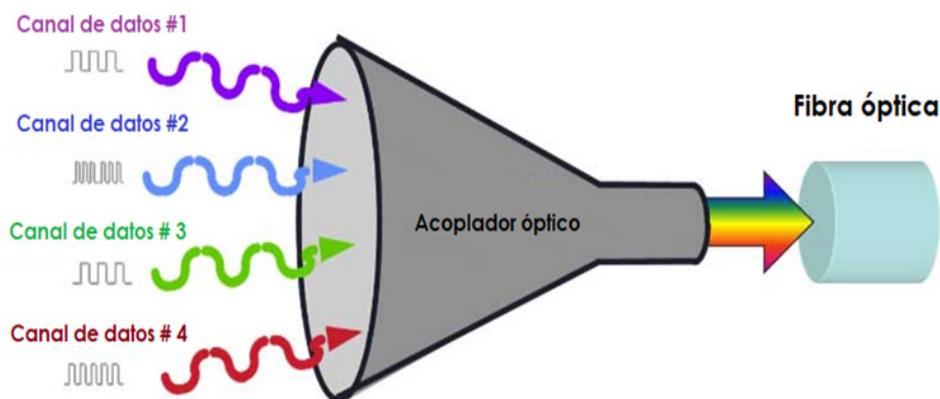


Fig. 2. Funcionamiento de un acoplador óptico. Dispositivo que permitió el desarrollo de las redes WSON [13].

Con el tiempo las interfaces Ethernet se convirtieron en el estándar dominante para los equipos receptores en redes WSON, con velocidades de manejo de datos ya estandarizadas entre 1 y 100 Gb/s (1, 10, 40 y 100 Gb/s), con longitud de onda fija de 50 GHz por canal. En la actualidad se busca implementar interfaces de Ethernet de hasta

400 Gb/s para enlace troncales (IEEE P802.3bs 400 Gb/s, Ethernet Task Force), lo que supone una limitación para rangos de transmisión por encima de los 100 Gb/s. Con esquemas de modulación más sofisticados, se requirieron canales ópticos con una mayor amplitud espectral, por encima de los 50 GHz utilizados hasta el momento. Para ello, en contraposición a la rejilla fija de 50GHz, la IUT-T introdujo la rejilla flexible, donde cada canal posee una frecuencia central con una anchura espectral variable múltiplo de 12.5 GHz. Esto permitió una mayor densidad de portadoras sobre el ancho espectral total. Este estándar se conoce como DWDM flexible. El contraste en el uso espectral se puede observar en la Figura 3.

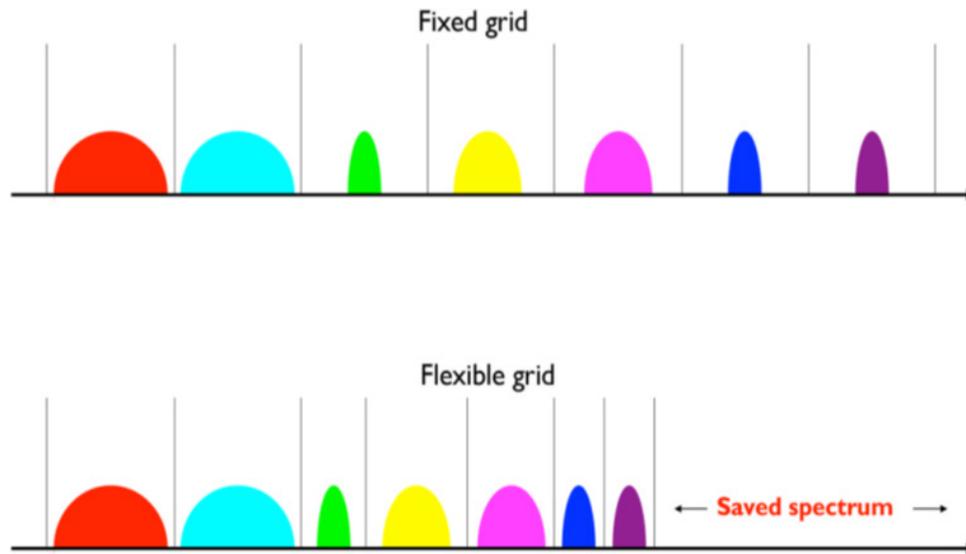


Fig. 3. Ejemplo de canales mediante rejilla fija vs canales con rejilla flexible [14].

3.3 Redes ópticas elásticas EON

Como se mencionó anteriormente, la demanda de una mayor velocidad de transmisión de datos (por encima de los 100 Gb/s) impulsaron la investigación en la implementación esquemas flexibles en la utilización de la capacidad espectral de la fibra óptica a fin de lograr aumentar la cantidad de canales empleables para la transmisión de datos como se muestran en la figura 2. Esto se logró con el empleo de conmutadores selectivos de longitud de onda (Wavelength Selective Switches, WSS) de ancho de banda variable (Bandwidth-Variable Wavelength Selective Switches BV-WSS) y del transpondedor de ancho de banda variable, que es un transpondedor que puede generar y detectar señales con requisitos de ancho de banda diferentes. Esto se debe a que puede soportar distintos tipos de modulación y diferentes tasas de código [7].

Esta ha sido la razón del impulso de las redes óptica elásticas EON. Para resolver el problema de asignación de recursos se optó por establecer tres parámetros que se deben cumplir. El primero es conocer la ruta más conveniente para la transmisión de datos; para ello, lo más empleados son los algoritmos de Dijkstra y de Baroni que son algoritmos que poseen las características utilizadas en el protocolo de enrutamiento OSPF (Open Shortest Path First). Luego se requiere un esquema de modulación adecuado, en este sentido, mientras más complejo sea el esquema de modulación, menor será su alcance de transmisión; sin embargo, el uso de un esquema complejo de modulación permite colocar señales dentro un menor ancho de banda, lo que representa una ventaja al tener un canal óptico que pueda soportar una mayor cantidad de canales para colocar portadoras de señal óptica. Una vez escogidos tanto el método de ruteo como el ancho de banda requerido, conocidos como los parámetros RSA (Routing and Spectrum Assignment) la combinación de ambos permite el posicionamiento de una señal en un canal que concuerde con los requerimientos establecidos [15].

3.5 Situación de la conmutación en los centros de datos

En los centros de datos actuales el 70% del enrutamiento se produce dentro de la misma red. Dicho enrutamiento se realiza mediante la conmutación de paquetes de datos utilizando para ello dispositivos electrónicos bajo arquitecturas de conmutación eléctrica. Esta tecnología está llegando a sus límites de eficiencia operativa ya que

su capacidad para ofrecer ancho de banda, cableado y manejo de potencia versus consumo de energía, ya no es escalable. Por estos factores la adopción de redes ópticas para centros de datos se está posicionando como el nuevo estándar para dichas redes dada la enorme capacidad de ancho de banda que supone la comunicación a través de caminos de luz y los ahorros asociados tanto en el uso de la energía como su aporte en la reducción de la huella ecológica sobre el planeta que provocan las redes de comunicación. Pero para aprovechar esta ventaja fundamental del medio para la interconectividad de dispositivos dentro de la red, se debe escoger una arquitectura de red óptica flexible que soporte mayores volúmenes de tráfico. Para ello se requerirá de los equipos adecuados para implementar los planos de control y de datos que puedan mantener un nivel bajo de latencia (mediante controladores y software) y un rendimiento de red elevado [16].

3.6 Problemas presentes en la capa física de las redes ópticas de datos

Los problemas que pueden encontrarse en la fibra óptica se pueden resumir en los siguientes tres aspectos:

•Efectos lineales

Las deficiencias físicas que no dependen de la potencia de la señal y que no deforman la luz, son denominados efectos lineales. Entre ellos se encuentra la atenuación, que es la degradación de la señal por desperfectos en la fibra tales como la presencia de microcurvaturas o macrocurvaturas, fluctuaciones en el diámetro de cable o falta de uniformidad en el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento de la fibra.

Otro efecto lineal es la dispersión cromática (Chromatic dispersion, CD), que es el desfase que se produce cuando los rayos de luz que se inyectan en uno de los extremos del cable, llegan en diferentes momentos del otro lado, lo que provoca un ensanchamiento de los pulsos y una pequeña alteración de la señal.

La dispersión debida al modo de polarización (Polarization mode dispersion, PMD) ocurre cuando los componentes de ortogonales de polarización viajan a velocidades diferentes, alcanzando al receptor en tiempos diferentes.

•Efectos no lineales

Son aquellos desperfectos que dependen la potencia de la señal. Entre ellos se encuentran la modulación auto-fásica (Self-phase modulation, SPM), que es producto de la interacción que se produce entre la luz y la materia. Cuando una onda luz viaja a través de la fibra óptica a una frecuencia elevada, se induce un índice de refracción variable del medio a causa del efecto óptico de Kerr. Al variar el índice de refracción, se produce un cambio en la fase del pulso.

La modulación de fase cruzada (Cross-phase modulation, XPM) es causada por la potencia de la señal en presencia de otras frecuencias portadoras que se propagan sobre la fibra y que produce un desplazamiento de la fase en la señal.

•Otros tipos de efectos

Otro efecto a considerar es la diafonía que es la pérdida de potencia debido a fugas en las interfaces de los equipos de interconexión de fibra. Las emisiones espontáneas añaden ruido a la señal.

La emisión espontánea amplificada (Amplified spontaneous emission ASE) sucede cuando la luz de las fuentes generadoras, por ejemplo, un láser, cambia su estado de energía de un nivel superior a uno inferior emitiendo luz en el proceso, lo que provoca ruido en la señal principal durante la etapa de amplificación.

Es importante conocer que, al principio, las rutas de transporte de datos en las redes ópticas se planificaban en función del camino de enrutamiento que presentara mayores dificultades o que fuese más largo. Sin embargo, con la necesidad de ofrecer un mayor dinamismo de enrutamiento se asumió que la calidad de la transmisión (Quality of transmission, QoT) debía adaptarse a los diferentes requerimientos de enrutamiento; por tanto, QoT debía evaluar todas las rutas probables y ofrecer aquella que garantizaran de manera probabilística el éxito de la transmisión de los datos por los caminos luminosos viables. Los modelos de QoT evalúan la acumulación de problemas físicos presentes en los diferentes caminos luminosos de enrutamiento, identificando los problemas antes mencionados, como atenuación, emisión espontánea amplificada XPM, entre otros. Es común asumir como el peor de los casos la presencia de XPM en el medio, cuando todos los canales se encuentran encendidos, de esta manera cualquier camino disponible puede ser una ruta viable independiente de la configuración espectral. Se ha evaluado que el cálculo de QoT sobre el tráfico real, resulta inviable dada la complejidad adicional que se introduce al sistema cada vez que se agrega un nuevo camino o trayecto luminoso. Esto se evidenció al intentar añadir extensiones de cálculo

de QoT a los protocolos GMPLS sobre redes WSON y EON. Por esa complejidad, la adopción de un sistema PCE o un controlador SDN para evaluar y calcular el QoT de las rutas se veía como una posible solución [17].

4. SISTEMAS DE CONTROL DE REDES ÓPTICAS DISTRIBUIDAS

Ya con redes WSON y EON muchos más sofisticadas y con velocidades de transferencia mucho mayores a los primeros escenarios descritos para las redes óptica de datos, surgió la necesidad de separar los planos de control del plano de datos en áreas independientes. El objetivo es contar con un plano de control operativo y capaz de dirigir actividades de recuperación de la red cuando ocurra una caída en la operación del plano de datos. De igual manera, el plano datos debe seguir funcionando incluso cuando el plano de control haya sido afectado por algún tipo de falla. De este tipo de configuraciones existen tres modelos a conocer. El modelo de Conmutación generalizada de etiquetas multiprotocolo GMPLS, las redes definidas por software SDN y el protocolo de elementos computacionales de ruta PCE.

4.1 Plano de control para la conmutación generalizada de etiquetas multiprotocolo GMPLS

Por lo general, cada elemento de red en el plano de datos posee un equivalente en el plano de control GMPLS, sin embargo, esto no limita el hecho de que un elemento del plano de control se encuentre asociado a dos o más elementos de red en el plano de datos. Donde puede existir diferencias considerables es en la topología del plano de control con respecto al plano de datos, aunque por lo general ambas suelen tener similitudes. Bajo estas consideraciones, los mensajes que pertenecen a los protocolos del plano de control se comparten en la red del plano de control, como sucede con los mensajes que se comparten en el plano de datos entre los elementos de red.

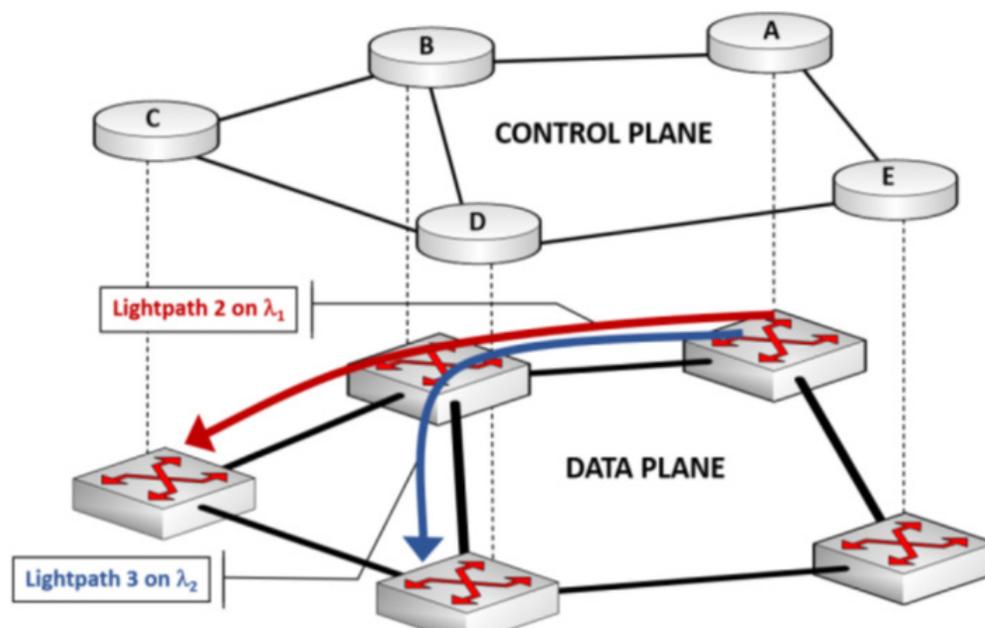


Fig. 4. Red óptica controlada por GMPLS [14].

Para comprender el funcionamiento del plano de control GMPLS, observe la Figura 4. En ella se puede apreciar que la configuración topológica del plano de control coincide con la topología del plano de datos identificada con los elementos de la red. Esto indica que cada nodo o elemento de la red posee un agente de control asociado a él. Se puede notar dos caminos de luz (Lightpath1 y Lightpath2 que utilizan las longitudes de onda λ_1 y λ_2 respectivamente). Para lograr que cada requerimiento de enlace se ejecute con éxito, GMPLS se apoya en tres protocolos principales que lo conforman. El primero es el protocolo de enrutamiento, conocido como OSPF-TE (Open Shortest Path First with Traffic Engineering) que se encarga de descubrir la topología de la red, indicando los caminos más cortos y con menor costo de traslado de la señal. La ingeniería de tráfico TE avisa cuales canales se encuentran disponibles y su rango de frecuencia. La señalización de la mejor ruta está a cargo del protocolo de reservación de recursos con ingeniería de tráfico (Resource Reservation Protocol with Traffic Engineering, RSVP-TE) que se

encarga de apartar los recursos necesarios para el traslado de la señal desde el punto de partida a la interfaz destino. Y, por último, el protocolo de gestión de enlaces (Link Management Protocol, LMP) se encarga de la supervisión del enlace para indicar el éxito o no del transporte de los datos [18].

Cada agente de control puede escoger para una señal determinada una longitud de onda, o espectro óptico, (Routing Switching Assignment, RSA, Routing Wavelength Assignment, RWA) aplicando algoritmos efectivos de enrutamiento y asignación, dependiendo de la información que publica OSPF-TE y el esquema RSA/RWA escogido.

4.2 Elemento de cálculo del trayecto (PCE)

En un plano de control GMPLS distribuido, la trayectoria de la ruta se calcula desde el punto de partida del recorrido, reservando los recursos necesarios en la etapa de señalización, sin embargo, un control distribuido como el GMPLS requerirá de un procesamiento elevado en cada nodo de control si se producen múltiples restricciones de ruta si la demanda de tráfico supera la capacidad de conmutación de la red. Esto podría derivar en rutas subóptimas si los datos de convergencia del plano de control no están debidamente actualizados. Por ello la IETF propuso la arquitectura de Elementos de cálculo de trayectoria (Path Calculation Element, PCE) que consiste en centralizar el cálculo de las rutas óptimas en equipos pertenecientes al plano de control cuya dedicación sea exclusiva. Los PCE recogen información de los protocolos de enrutamiento como, por ejemplo, de OSPF-TE, y toman las decisiones de enrutamiento de forma centralizada para cada nodo de la red. PCE también puede recabar información de la red mediante una comunicación directa con el sistema de gestión de la red. La comunicación se establece mediante el Protocolo de Comunicación de los Elementos de Cálculo de trayectos (Path Computation Element Protocol, PCEP) [19]. Utilizar PCE también ayuda a resolver los problemas de contención de solicitudes de enrutamiento si, en vez de esperar escuchar la publicación de rutas de OSPF-TE, se realizan procedimientos proactivos para actualizar las bases de datos PCE. Estos mecanismos anularían los factores de bloqueo. Sin embargo, dentro de las desventajas que podría tener una implementación centralizada de rutas como PCE, los investigadores han identificado un intervalo de recuperación mayor de la red con PCE debido a los protocolos PCEP de comunicación cuando se está restaurando la red de una falla. Esto traería encolamiento de requerimientos. A pesar de ello, algunos autores afirman que los tiempos de latencia tenderían a ser insignificantes en un escenario de aprovisionamiento, ya que PCE incluso tiene en cuenta los problemas de transmisión del canal para los cálculos de ruta. En la figura 5 se observa cómo podría ser una red con control PCE de enrutamiento [15].

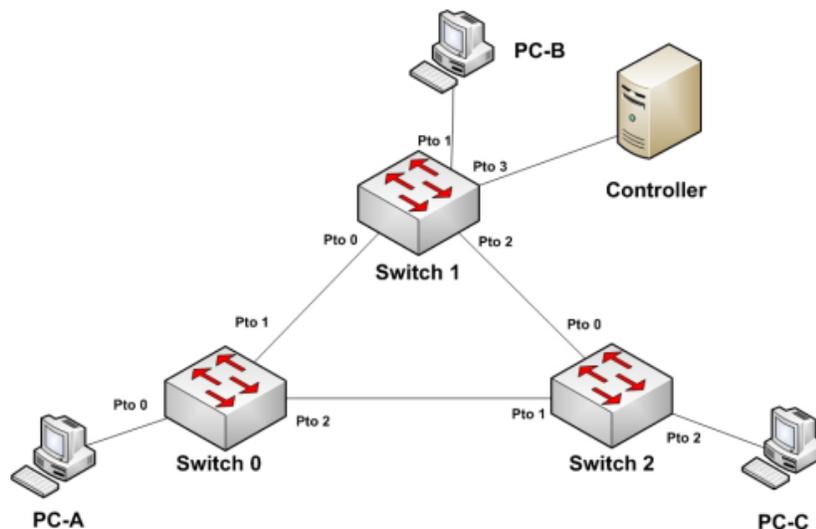


Fig. 5. Arquitectura de referencia del plano de control y de datos GMPLS distribuido con PCE (la topología del plano de control puede ser diferente con respecto a la del plano de datos) [14].

5. CONTROL DE REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE SDN (SOFTWARE DEFINED NETWORK)

Hasta este momento se ha detallado la evolución de la administración y del plano de control de las primeras redes ópticas [20] para satisfacer las demandas de enrutamiento de tráfico de datos. Sin embargo, el volumen de requerimientos no ha hecho sino expandirse debido a una demanda que no para de crecer. Para seguir satisfaciendo la demanda de interconexiones cada vez más rápidas, se propone el modelo SDN, que permite la administración de una red de datos mediante el uso exclusivo de software. Para ello se plantea la necesidad de separar el plano de datos del plano de control de la red. El primero representa el soporte físico de la red (dispositivos) que correspondería al plano de datos, quien se encarga de los procesos de reenvío del tráfico de la red a sus respectivos destinos; y el segundo representando al plano de control donde se ejecuta la configuración de la red a través de un sistema operativo (operative system, OS) específico. Este OS se ejecuta dentro de los dispositivos de red, creando y manteniendo un conjunto de directrices o reglas determinadas. Un mismo dispositivo puede asumir un conjunto de labores sin necesitar añadir hardware adicional. Un equipo puede realizar las labores de enrutamiento, conmutador y cortafuego mostrando un alto nivel de flexibilidad en lo referente a la administración de dispositivos. La configuración de una red SDN puede observarse en la Figura 6.

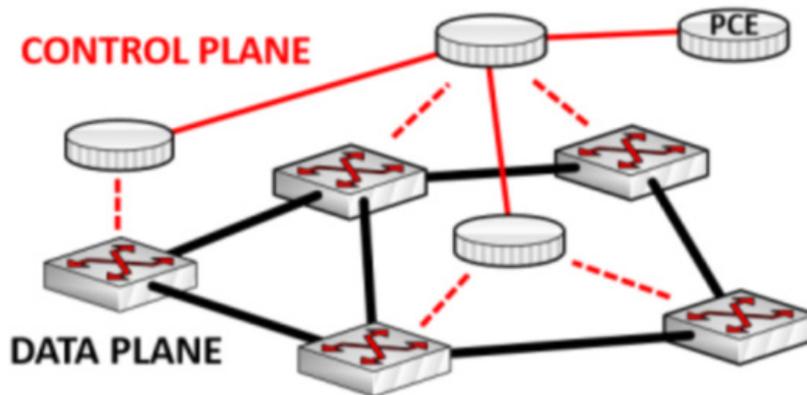


Fig. 6. Esquema básico de una red SDN [21].

En ella se puede apreciar un elemento que aún no se ha mencionado, el cual es el dispositivo Controlador (Controller). Este elemento de la arquitectura SDN tiene como propósito el comunicarse con todos los dispositivos de la red mediante interfaces y protocolos dedicados a dicha labor. Con ello busca monitorizar y enviar las configuraciones necesarias para el correcto funcionamiento de las reglas de operación.

Las redes SDN han sido implementadas con éxito en las redes ópticas de datos SDON (Software defined Optical Network), donde los investigadores como la industria se han concentrado en desarrollar los modelos de implementación a fin de crear estándares para dichas redes en lo que corresponde al plano de control, a la capa de aplicación (UX) y de infraestructura (operación). El paradigma SDN se ha implementado con éxito en la virtualización de redes y la denominada orquestación de redes tanto multicapa como multidominio [22].

Como se mencionó arriba, las redes SDN se han implementado en redes ópticas de datos SDON, sin embargo, fueron diseñadas en un principio para administrar redes de datos por paquetes. La interfaz que se desarrolló para el plano de control se denomina Openflow, desarrollada por la Open Networking Foundation. Esta interfaz, desarrollada para redes de paquete no escaló bien para las redes ópticas de datos por lo que se requirió desarrollar un nuevo estándar compatible con las redes ópticas. Este estándar se denominó NET-CONF el cual es el uso. Entre sus características se encuentran:

- Utiliza el método de llamada de procedimiento remoto (Remote procedure call, RPC) para la interacción del

controlador SDN y el agente SDN tanto para la monitorización como para la configuración.

- Los RPCs puede definirse de forma personalizada mediante el uso de interfaces de programación de aplicaciones (Applications programming interface. API).

En los últimos años se ha hecho un esfuerzo para alcanzar estándares SDN mediante proyectos de código abierto a fin de generalizar tanto la implementación del controlador SDN como los dispositivos ópticos.

5.1 Control de redes multicapa

Las redes multicapa presentan en su infraestructura segmentos de enrutamiento donde existen tanto tecnologías conmutadas electrónicamente como aquellas con conmutación óptica. SDN no solo permite el control de la capa óptica, sino que facilita también la integración de otras tecnologías de la capa de red. Por ejemplo, el proyecto ONOS (Open Network Operating System) desarrollado por la Linux Foundation, se ajusta a diferentes protocolos de tal manera que permite configurar equipos de conmutación óptica o por paquetes, abriendo una manera de implementar dos tipos de capas de red simultáneamente. Algunas investigaciones permiten observar como la utilización de controlador ONOS en conjunto con un orquestador Open Source Mano permite una mayor autonomía de red, ya que flexibiliza la utilización de elementos de red de diversos fabricantes, apoyando la virtualización de las funciones de red (Network Function Virtualization, NFV).

6. CONMUTACIÓN ÓPTICA DE PAQUETES EN REDES DE CENTROS DE DATOS

Los centros de datos presentan características particulares que requieren la implementación de soluciones que se apeguen a un conjunto de necesidades operativas muy específicas. En este aspecto radica la complejidad de asumir un enfoque u otro. Sin embargo, existen lineamientos que pueden ofrecer soluciones de manera generalizada, realizando una segmentación según las conexiones entre servidores. Si los servidores se encuentran ubicados en el mismo rack (conexiones intra-racks), si se encuentran en diferentes racks (conexiones inter-racks), si se requiere el agrupamiento de un conjunto de racks en un subconjunto de racks (clusters) dentro del centro de datos. Dependiendo de estos lineamientos se han investigado implementaciones para centros ópticos de datos.

• Conexiones Intra-racks

Para la comunicación entre los bastidores en un mismo rack, se han desarrollado múltiples propuestas para la conmutación óptica de paquetes en centros de datos, sin embargo, una de las más exitosas es el llamado anillo óptico de conmutación de paquetes. Sus ventajas fueron propuestas en proyectos como Dual Bus Optical Ring Network (DBORN) [23], entre otros. Otras alternativas vienen de la mano de las arquitecturas Torus [24] y Clos [25], esta última desarrollada por ejemplo en el proyecto ROTOS. También se ha considerado el empleo de direccionamiento basado en la longitud de onda en aquellas arquitecturas basadas en el enrutamiento de guía de ondas dispuestas (Arrayed waveguide grating routers, AWGR).

• Conexiones inter-racks

Para el control de los paquetes de datos enrutados hacia los segmentos compartidos entre racks de servidores, se requiere de los programadores de paquetes ópticos, para que las longitudes de onda sean asignadas a las diferentes conexiones establecidas según los espacios espectrales correspondiente a cada longitud de onda. Puede prescindirse de los programadores de paquetes ópticos utilizando matrices de permutación que posean lógicas de concesión y arbitraje de enlaces ópticos. La programación de paquetes ópticos podría necesitar analizar la calidad de servicio (Quality of services, QoS) y las limitaciones de medio óptico. Se han documentado la implementación de hardware programable en formato FPGA (Field Programmable Gate Arrays) y en formato ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), con características como QoS, Capacidad de detención y control SDN con tiempos de conmutación en un intervalo de microsegundos hasta nanosegundos con control centralizado.

Las soluciones más generalizadas para la interconexión de servidores en un mismo rack se basan en el uso de un único dominio óptico, como, por ejemplo, la longitud de onda. Esto para eludir la contención de recursos y lograr la conmutación de los paquetes ópticos. Esto fue empleado en el proyecto OSMOSIS y OPSsquare. Las arquitecturas donde pueden emplearse esta aproximación de conmutación de datos abarcan las redes full-mesh, crossbar o Clos.

6.1 Plano de control de latencia ultra baja

La conmutación por circuitos en redes ópticas puede reconfigurarse en milisegundos, debido a la complejidad de la programación centralizada de estas arquitecturas. La consecuencia directa es el aumento del nivel de latencia que se acumula durante la conmutación. Si se sustituyen los conmutadores electrónicos de última generación por conmutadores ópticos basados en programación central con un plano de control implementado en placas FPGA con un circuito en dos etapas asíncronas ASIC MOS, los niveles de latencia se reducen en un 42%. A este tipo de implementaciones entra racks ubicados en los centros de datos se les denomina implementaciones de baja latencia, las cuales están en el orden de los nanosegundos. el plano de control implementa colas FIFO (First In- First out) en la interfaz de red monitoreando la presencia de datos; si no está vacío, hace una petición de interfaz de destino al planificador. Una vez transcurrido el tiempo de control envía el paquete de manera especulativa (sin control de falla, “olvidando” el paquete) lo que elimina retrasos en el transporte y gastos de sincronización. El tiempo de control permite que los paquetes lleguen al conmutador en un tiempo justo para que la interfaz se encuentre configurada. Luego los paquetes se envían en diferentes longitudes de onda de forma segmentada, luego se multiplexan y son enviados como una unidad [26].

6.2 Plano de control Multiplano

La arquitectura que pareciera más sostenible y escalable en el tiempo aquellas multiplano, que utiliza dos dominios de conmutación que pueden tener un conjunto de combinaciones, como el espacio y la longitud de onda, el espacio y el tiempo, el momento angular OAM y la longitud de onda, etc. Esto logra jerarquizar los procesos de conmutación donde un dominio se encarga de la supervisión de las tarjetas conmutación, y el otro de cada uno de los puertos ubicados en cada tarjeta, evitando un deterioro físico importante y una mayor escalabilidad de enrutamiento óptico.

Tanto la arquitectura de un solo plano de conmutación como aquellas multiplano requieren un programador y un controlador que puedan escalar y que sean rápidos, implementado de manera centralizada. Para aquellas arquitecturas de un solo plano de conmutación se puede utilizar un algoritmo de programación convencional como el basado en correspondencia máxima. Si la arquitectura es multiplano requiere de algoritmos de programación a la medida, que puedan paralelizar los cálculos de los dominios, aumentado con ello el rendimiento de la red y permitiendo una programación muy ágil. Con las implementaciones FPGA o ASIC se logra una envergadura de 1000 puertos y una tasa de conmutación medida en microsegundos [14].

Los más reciente en la administración y control de las redes ópticas de centros de datos es la fijación de muchos componentes de la red en un solo circuito integrado, lo que conllevará a nuevos retos en la forma en serán empaquetados los mensajes y datos en las redes ópticas de centros de datos.

6.3 Plano de control para interconexión POTORI (Passive Optical Top-Of-Rack Interconnect)

POTORI es un tipo de interconexión óptica pasiva para la arquitectura ToR (Top of Rack) diseñada para el nivel de acceso en los centros de datos, donde el plano de datos utiliza componentes ópticos pasivos para interconectar servidores dentro de un rack. En lo concerniente al plano de control, este posee dos enfoques principales, el implementado para POI (Passive Optical Interconnect) basados en parejas (couple-based) y para POI basado en Rejilla de guía de ondas dispuesta (Arrayed Waveguide Grating, AWG). El plano de control de POTORI puede integrarse fácilmente en la arquitectura de control global de todo el centro de datos. El controlador del rack puede conectarse a un controlador de centro de datos de capa superior. En concreto, el controlador de rack, como se muestra esquemáticamente en la Figura 6. puede estar equipado con una tabla de conmutación configurable (una tabla de conmutación OpenFlow) y un módulo de asignación de recursos configurable, de modo que las reglas de flujo y el algoritmo DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) empleado pueden ser actualizados dinámicamente por el controlador de centro de datos.

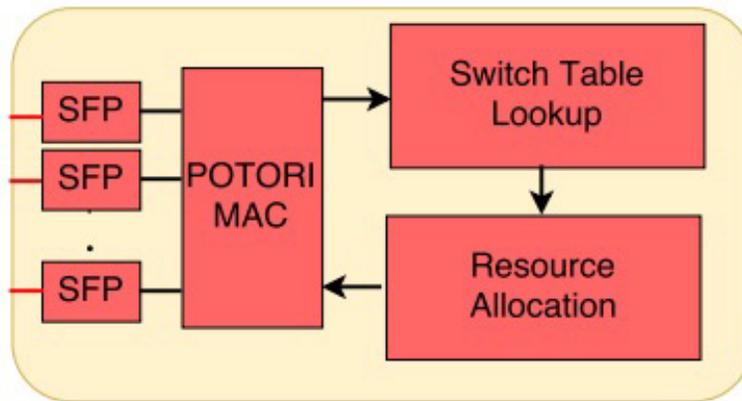


Fig. 6. Controlador de Rack POTORI [27].

El rendimiento de la interconexión POTORI en comparativa con las redes conmutadas tradicionales basados en los parámetros de retardo y descarte de paquetes promedia los 50ns en tiempo de sintonización del transector y el tiempo máximo de transmisión de cada ciclo (TM) es de 1,2 μ s [27].

7. RESULTADOS

Un aspecto importante a destacar en la bibliografía consultada es la necesidad de identificar un punto de equilibrio entre las redes ópticas donde el plano de control se encuentra separado completamente del plano de datos y aquellos que aún integran parcialmente funciones de control y gestión de recursos de red. Esto se destaca especialmente en los análisis de recuperación de redes y el intervalo de tiempo que toma a cada arquitectura converger. Esto quiere dar a entender que todavía existen campos de investigación donde se pueda investigar de qué manera se puede aprovechar las mejores cualidades tanto de las redes ópticas con plano de control centralizado como aquellas redes ópticas con plano de control distribuido.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo ha hecho una síntesis sobre la evolución histórica de las redes ópticas de datos, mostrando los esfuerzos realizados tanto por los investigadores como la industria en lo referente a la gestión y control de dichas redes en los últimos años, haciendo especial enfoque en los métodos desarrollados en el plano de control tanto para redes generales (como pueden ser las redes metro) como para centros de datos.

Cuando el plano de control de la red pasó a ser un elemento separado del plano de gestión, se logró un dinamismo notorio en la administración del tráfico de red, que al operar sin necesidad de que el plano de gestión interviniera necesariamente en las funciones de enrutamiento y señalización de red, posibilitó el manejo de una cada vez mayor cantidad de información y de peticiones de enrutamiento en las redes tanto tradicionales como ópticas. A partir de la protocolización del plano de control, se pudo observar que ha existido una continua oscilación entre los enfoques de control distribuido y de control centralizado en las redes ópticas. Una vez rebasada la capacidad de administración centralizada en el plano de gestión de las rutas en las primeras redes ópticas, debido a la creciente necesidad de dinamismo de enrutamiento, los primeros protocolos de enrutamiento, señalización y control que fueron implementados tuvieron un enfoque distribuido. Hablamos del conjunto de protocolos GMPLS. Cuando se conocieron las falencias de estos protocolos al momento de presentarse alguna falla en la red, en la convergencia de rutas o en la restauración de rutas, se pensó nuevamente en centralizar ciertos aspectos del plano de control. De esta manera, al implementarse el elemento de cálculo del trayecto PCE se pudo sincronizar la actualización de la base de datos y el cálculo de la trayectoria teniendo en cuenta las condiciones del medio óptico.

Con el desarrollo de las redes SDN, se logra la desvinculación completa entre los planos de gestión y control, entrando a una nueva era en el desarrollo de soluciones de red, permitiendo que conceptos como la desagregación permitan la interoperabilidad entre de redes ópticas desarrolladas con diferentes fabricantes de equipos, unificando los protocolos de operación.

En lo referente a los centros de datos, los últimos enfoques han demostrado que, dado el desarrollo continuo de aplicaciones y servicios que demandan cada vez más el transporte de grandes cantidades de información, ha

requerido el desarrollo de soluciones de enrutamiento cada vez más dinámicos. Por ellos los problemas de latencia entre rack dentro del mismo bastidor como entre bastidores necesitan la implementación de soluciones particulares, todas dentro de la adopción de elementos ópticos o híbridos, que permitan una mínima latencia. Según lo investigado existen dos aproximaciones con que cumplen las necesidades de enrutamiento. Aquellas que emplean un planificador y un controlador dentro de esquemas SDON, como las de configuración de latencia ultra baja o las de multicapa, han mostrado en los ambientes de investigación tener un nivel de éxito aceptable tanto en los niveles de latencia como en el control de errores; sin embargo, en los centros de datos se presenta la necesidad de conseguir arquitecturas a la medida, por lo que no se pudo generalizar un comportamiento de la red cuyo éxito sea suficientemente influyente como para convertirse en un estándar. Queda por explorar aquellas soluciones que emplean Machine Learning y telemetría óptica, que requerirían un estudio aparte al propósito de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] S. Reynolds, «Evolución De Las Redes Ópticas,» Prisma Tecnológico, vol. 2, n° 1, pp. 11-14, 2010.
- [2] M. B. Díaz Yáñez y M. S. Jiménez Jiménez, «Estudio de la Conmutación de Longitudes de Onda para Multi-protocolo (MPλS) en Redes ASON (Automatically Switched Optical Network),» Quito, 2010.
- [3] G. Jaramillo Andrade, «Estudio de la tecnología de conmutación óptica por ráfagas– OBS y análisis de migración de redes ópticas pasivas esta tecnología,» ESPE, Quito, 2011.
- [4] A. Dasari, «Optical fiber Communication Evolution, Technology and Future Trends,» Journal of Advance Research in Electrical & Electronics Engineering, vol. 2, n° 8, pp. 28-35, 2015.
- [5] A. E. Chan Garcia, «Fibra óptica: evolución, estándares y aplicaciones,» Universidad de Quintana, Chetumal, 2020.
- [6] D. A. Buelvas Peñarredonda, I. D. Téllez Silva y E. Amado Mateus, «REDES ÓPTICAS DWDM: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN,» Visión Electrónica, vol. 4, n° 1, pp. 70-80, 2010.
- [7] J. J. Granada-Torres, A. M. Cárdenas-Soto y G.-G. Neil, «Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones,» Respuestas, vol. 20, n° 2, pp. 6-22, 2015.
- [8] A. Ferrari, A. Napoli, J. K. Fischer, N. Costa, A. D'amico, J. Pedro, W. Forysiak, P. Ewarn, L. Andrew, S. Alexandros, J. P. Giménez, G. Roelkens, N. Calabretta, S. Abrate, B. Sommerkorn-Krombholz, y V. Curri, «Assessment on the Achievable Throughput of Multi-band ITU-T G.652.D Fiber Transmission Systems,» Journal of Lightwave Technology, vol. 1, n° 1, pp. 1-14, 2020.
- [9] D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, K. Hiraga y T. Nakagawa, «Orbital Angular Momentum (OAM) Multiplexing: An Enabler of a New Era of Wireless Communications,» IEICE Transactions on Communications, Vols. %1 de %2E100-B, n° 7, pp. 1044-1063, 2017.
- [10] M. Garrich Alabarce y P. Pavón Mariño, «Optical network design and analysis tools: A test of time,» Optical Switching and Networking, vol. 44, n° 2020, pp. 1-8, 2021.
- [11] IETF, «Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture, RFC3945,» IETF, New York, 2004.
- [12] Transparencia Muni La Union, «<http://transparencia.munilaunion.cl/>,» 13 abril 2010. [En línea]. Available: http://transparencia.munilaunion.cl/Documentos/Tramites/_ocs.pdf. [Último acceso: 15 enero 2022].
- [13] Ciena, «¿Qué es WDM o DWDM?,» [En línea]. Available: https://www.ciena.com.mx/insights/what-is/What-Is-WDM_es_LA.html. [Último acceso: 03 enero 2022].
- [14] N. Andriolli, A. Giorgetti, P. Castoldi, G. Cecchetti, I. Cerutti, N. Sambo, A. Sgambelluri, L. Valcarenghi, F. Cugini, B. Martini y F. Paolucci, «Optical networks management and control: A review and recent challenges,» Optical Switching and Networking, vol. 44, n° 2022, pp. 1-19, 2021.
- [15] I. Chlamtac, A. Faragó y T. Zhang, «Lightpath (wavelength) routing in large WDM networks,» IEEE Xplore, vol. 14, n° 5, pp. 909-913, 1996.
- [16] P. Baziana, «AuTO: scaling deep reinforcement learning for datacenter-scale automatic traffic optimization,» Fairfax, VA, USA, 2021.
- [17] D. F. Grosz, «Sistemas de comunicación por fibra óptica de alta capacidad,» CSI, vol. 51, n° 2003, pp. 22-33, 2003.
- [18] S. Kaczmarek y M. Mlynarczuk, «Simulator for Performance Evaluation of ASON/GMPLS Network,» IEEE Access, vol. 9, n° 2021, pp. 108293- 108304, 2021.

- [19]M. Bhumi Reddy, J. Thangaraj y V. Priye, «Connection Provisioning for PCE-Based GMPLS Optical Networks,» *Wireless Personal Communications*, vol. 103, n° 4, pp. 2775 - 2790, 2018.
- [20]R. de Paz Villarroel, «Aplicación de SDN en redes ópticas: análisis preliminar,» Universidad de Valladolid, Valladolid, 2015.
- [21]M. Ramírez Giraldo y A. M. López Echeverry, «Redes de datos definidas por software - SDN, arquitectura,» *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 10, n° 1, pp. 55-61, 2018.
- [22]B. Chand Chatterjee, *Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management*, 1st ed., London: CRC Press Taylor&Francis Group, 2020.
- [23]G. Hu, G. C. M. y S. Junghans, «Performance of MAC Layer and Fairness Protocol for the Dual Bus Optical Ring Network (DBORN),» 2005, 2005.
- [24]R. Takahashi, T. Segawa, I. Salah, T. Nakahara, H. Ishikawa, A. Hiramatsu, Y.-C. Huang y K.-i. Kitayama, «Torus Data Center Network With Smart Flow Control Enabled by Hybrid Optoelectronic Routers,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, n° 12, pp. B141-B152, 2015.
- [25]P. Andreades y G. Zervas, «Parallel Modular Scheduler Design for Clos Switches in Optical Data Center Networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, n° 13, pp. 3506 - 3518, 2020.
- [26]P. Andreas, K. Clark, P. M. Watts y G. Zervas, «Experimental demonstration of an ultra-low latency control plane for optical packet switching in data center networks,» *Optical Switching and Networking*, vol. 32, n° 2019, pp. 51-60, 2018.
- [27]Y. Cheng, «Optical Interconnects for Next Generation Data Centers,» KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2019.