

Redes WDM PON: Tendencias y Propuestas Para Viabilizar y Optimizar su Implementación

Arévalo G.*; Sierra J.**

*Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Electrónica, Quito, Ecuador
e-mail: garevalo@ups.edu.ec

** Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingenierías, Medellín, Colombia
e-mail: javier.sierra@upb.edu.co

Resumen: Las redes ópticas de nueva generación representan una de las soluciones más prometedoras para satisfacer la altísima demanda de banda ultra ancha exigida por el exponencial incremento del tráfico desde y hacia usuario final. Particularmente las redes WDM-PON ofrecen una de las soluciones de mayor escalabilidad, sobre todo a través del empleo de técnicas de modulación especial o de aprovechamiento del canal (como UDWDM), pero a costa del incremento de la complejidad de la red y por consiguiente, del costo. Este artículo hace un estudio de las principales propuestas para los problemas que limitan la implementación a gran escala de las redes PON de nueva generación haciendo énfasis en el estudio de las principales tendencias y abarcando las redes PON a las que se da mayor enfoque en la investigación actual.

Palabras clave: Wavelength-division multiplexing (WDM), passive optical networks (PONs), optical network unit (ONU), dynamic band width and wave length assignment (DBWA).

Abstract: New generation optical networks present one of the most promising solutions for satisfying the ultra-wide bandwidth demand required by the exponential increase of traffic to and from final users. Particularly, WDM-PON offer one of the most scalable solutions. Even, the WDM-PON capability is further potentiated by the use of advanced modulation formats and spectrum optimization techniques (like UDWDM). However, this increases the complexity and in consequence the cost. The present work makes a review of the main problems related with the limitations for new generation PON great scale deployment. We make emphasis in the main tendencies and most popular PON technologies which are currently under research.

Keywords: Wavelength-division multiplexing (WDM), passive optical networks (PONs), optical network unit (ONU), dynamic band width and wave length assignment (DBWA).

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tráfico demandado por los usuarios de redes de acceso de alta capacidad está creciendo de forma exponencial. Esto hace que soluciones como WDM-PON y UDWDM-PON tengan viabilidad para implementación a gran escala a mediano plazo. Uno de los principales problemas es sin embargo los altos costos involucrados en la implementación de este tipo de redes, por lo que es indispensable determinar estrategias y modelos de implementación que optimicen los costos de implementación y optimicen a su vez la explotación de los recursos disponibles en la red, manteniendo altas tasas de velocidad de acceso y de disponibilidad.

En efecto, las redes WDM PON tienen un gran potencial, si es que se logra optimizar sus costos de implementación, para ofrecer un adecuado costo-beneficio con una muy buena eficiencia energética. Es así que WDM-PON se ha constituido en un tema popular de investigación en años recientes debido a la gran cantidad de problemas alrededor de

esta tecnología que no han sido resueltos aún tales como el despliegue de láseres sintonizables de bajo costo que viabilicen la transmisión upstream, la asignación dinámica de canales y ancho de banda, la redundancia y sistemas de recuperación frente a fallos en la fibra, entre otros. Uno de los problemas que están siendo confrontados con más fuerza es precisamente la búsqueda de soluciones que permitan hacer viable económicamente la implementación de la red de distribución óptica de una WDM-PON [1], [2].

El presente trabajo hace una revisión de las tecnologías ópticas de nueva generación en las cuales la comunidad científica ha estado y continúa actualmente trabajando, enfocándose particularmente en el estudio de redes del tipo WDM PON. En la sección II del artículo se describen las soluciones que se han propuesto para lograr altas tasas de bits en grandes distancias con el menor costo posible. La sección III describe brevemente propuestas para la asignación dinámica de longitudes de onda y ancho de banda, mientras que la sección IV hace un barrido de las propuestas para optimizar los costos de implementación de la red de distribución óptica en redes PON de nueva generación, tales como WDM PON y LR PON. En la sección V se resaltan las ventajas del uso de clusterización de tamaño variable con el

Artículo recibido el 16 de diciembre, 2014;
Para contactos y correspondencia: Av. 12 de Octubre, N24-22 y Wilson, Universidad Politécnica Salesiana, Campus Girón. Teléfono: 23962800, ext. 2627.

fin de optimizar los costos de implementación de la red. Finalmente la sección VI presenta las conclusiones más relevantes al respecto del estudio realizado en el este artículo.

2. BÚSQUEDA DE TRANSMISORES DE BAJO COSTO

Las redes pasivas de nueva generación (*NextGeneration*) NG-PON ofrecerán tasas de transmisión de datos más allá de los 10 Gb/s mediante la asignación de longitudes de onda dedicadas por cada canal, así como por el uso de transmisores y receptores sintonizables tanto en el extremo del proveedor de servicios como del lado del usuario [3]. Uno de los problemas más complejos relacionados con el desarrollo comercial de estas redes es la búsqueda de terminales ópticas de usuario de alta velocidad pero de bajo costo. La transmisión de bajada es menos sensitiva al costo por el hecho que los costos son absorbidos por la infraestructura del proveedor de servicios pero en el caso de la transmisión de subida (que depende de los equipos en la ONU), los costos son parcialmente absorbidos por los usuarios finales.

También tiene que tomarse en cuenta el requerimiento de soluciones sintonizables, es decir de equipos que no trabajen a una sola longitud de onda sino que tengan la capacidad de ajustar su transmisión a distintas longitudes de onda (un concepto denominado “*colorless*”), lo cual hace aún más compleja la búsqueda de soluciones de bajo costo debido al valor agregado, en capacidad pero también en precio de comercialización, que esta última característica implica. Es así que existen principalmente tres alternativas para la transmisión de subida en una WDM-PON que son potencialmente comerciables: el uso de láseres sintonizables, el uso de una fuente de luz común de amplio espectro (*Broadband Light Source - BLS*) y la remodulación de la señal de bajada para convertirla en señal de subida a través del uso de un modulador reflectivo[4], [5].

Debido al hecho de que el costo de la BLS es compartido entre todos los usuarios en la red, esta solución ha sido popular en varias propuestas donde se incluye el uso de una fuente de luz continua (*continuous wave*) CW-BLS con el fin de proveer de luz semilla para transmisores en las ONUs que operen mediante la técnica de inyección de luz forzada (*injection-locked optical transmitters*). Sin embargo, esta clase de fuentes ofrecen un ancho espectral bajo y una alta intensidad relativa de ruido (*Relative Intensity Noise - RIN*), lo cual limita la tasa de bits potencial a alrededor de 1 Gb/s [6]–[8]. La BLS se implementa generalmente a través de uno o más amplificadores de fibra dopada de erbio (*Erbium Doped Fiber Amplifiers - EDFAs*) conectados en cascada.

También es posible emplear no solo la BLS sino otro tipo de fuentes de luz con el fin de reducir el consumo de potencia, aunque involucrando generalmente un inconveniente aumento en los costos. Por ejemplo, en [9] se propone una red WDM-PON que ahorra más del 50% de la potencia óptica de bombeo mejorando el presupuesto de potencia global de la red mediante el uso de dos fuentes de luz multi-longitud de onda, cada una consistente en un EDFA

independiente con muchos reflectores selectores de longitud de onda.

Existen muchas opciones para el uso de fuentes de luz sintonizables en una ONU, como el uso de láseres DFB-LD (*Distributed Feedback Bragg-reflector Laser Diodes - DFB-LDs*) o láseres de cavidad externa (*External Cavity Lasers - ECLs*), los cuales pueden ser manejados directamente o empleando moduladores externos. Sin embargo, en la actualidad este tipo de láseres están lejos de ser efectivos en costo desde el punto de vista de una comercialización masiva. De modo que una opción atractiva es precisamente evitar el uso de este tipo de dispositivos mediante la remodulación de la señal de bajada para convertirla en datos de subida.

Al respecto de la remodulación de la señal de bajada, uno de los dispositivos más populares para el efecto es el amplificador óptico semiconductor reflectivo (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier - RSOA*). La principal ventaja del RSOAs es que permite evitar el uso de un láser sintonizable en la ONU, pero su principal desventaja es su relativamente baja capacidad espectral (comparado con un láser sintonizable de alta capacidad). El ancho espectral de un RSOA típicamente llega hasta los 2.5 GHz, lo cual limita la tasa de bits precisamente alrededor de 2.5 Gb/s para distancias no mucho mayores a 20 km. En la figura 1 se muestra una topología WDM-PON que emplea RSOAs en sus ONUs.

Dado que el RSOA permite transmitir datos de subida con altos niveles de potencia, el alcance de la red puede incrementarse siempre y cuando la tasa de bits se mantenga relativamente baja, es decir, dentro de los límites impuestos los problemas que inevitablemente se derivan del uso de estos dispositivos como el RIN, el ancho de banda limitado, la pérdida de sintonización de la longitud de onda (*wavelength-detuning - WD*), la ganancia dependiente de la polarización (*Polarization Dependent Gain - PDG*) y la dispersión inducida por el alto desplazamiento en frecuencia (*chirp*) que sufren estos dispositivos. Se han propuesto redes LR WDM-PON bidireccionales operantes a 2.5 Gb/s que emplean láseres del tipo Fabry-Perot (*Fabry-Perot laser diodes - FP-LDs*), sintonizados mediante auto bloqueo de inyección de longitud de onda (*self-injection locked*), como fuentes continuas (CW) de luz para RSOAs[10], [11]. Estos sistemas alcanzan transmisión sin errores (BERs iguales o menores a 10^{-12}) a través de distancias de hasta 70km sin el empleo de técnicas especiales de modulación (sino la simple modulación on-off keying (OOK)).

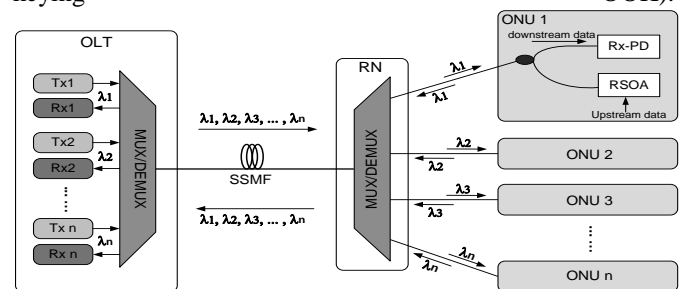


Figura 1. Diagrama esquemático de una WDM-PON con transmisor de ONU basado en RSOA.

Mediante el uso de técnicas de modulación especial, como la modulación diferencial de desplazamiento de fase (*DifferentialPhaseShiftKeying* - *DPSK*), o la modulación diferencial de desplazamiento de fase en cuadratura (*DifferentialQuadraturePhaseShiftKeying* - *DQPSK*) o inclusive la multiplexación por división de polarización (*PolarizationMultiplexing* - *POLMUX*), se han reportado WDM-PON basadas en RSOA capaces de transmitir a tasas iguales o mayores a 10 Gb/s en enlaces de 20 km [12], [13], o inclusive mucho mayores velocidades en enlaces de mayor distancia mediante el uso de compensación de dispersión [14] o la ecualización de la señal alternativamente combinada con FEC [15], [16]. Sin embargo, estos alcances se logran a través de un incremento en la complejidad de las ONU, lo cual puede resultar en altos costos de implementación y a su vez en penalizaciones en el presupuesto de potencia de la red. Por ejemplo, existe una penalización de 10 dB de potencia en una transmisión basada en DPSK debido a la detección de señal requerida para la transformación de la señal OOK en una DPSK [12]. Adicionalmente se ha probado el uso de OFDM (*OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing*) dado su alta optimización del espectro y su robustez ante la dispersión, lográndose transmisiones mejoradas basadas en RSOA a 10 Gb/s o mayores [17], [18], [19]. La principal desventaja de esta solución es la complejidad de los circuitos electrónicos que demanda.

Un RSOA debe trabajar en la región de saturación de ganancia, lo que provoca que el presupuesto de potencia de la red deba incrementarse con el fin de lograr que llegue suficiente potencia a la ONU y que el RSOA trabaje en régimen parcial de saturación. Además, el radio de extinción (*extinction ratio* - *ER*) en la señal de bajada debe ser bajo con el fin de permitir una potencia de nivel cero relativamente alta y que permita mantener la condición de saturación. En [20] se presenta una propuesta que permite disponer de un ER de señal de bajada tan alto como 9 dB en una ONU basada en RSOA operante a 1.25 Gb/s que emplea una técnica de ajuste del nivel de umbral de decisión.

Otra técnica que puede usarse para mejorar la transmisión con RSOA es la variación de la longitud de onda de desacople en la transmisión de subida [21] y el uso de subportadoras para evitar la diafonía entre señales de bajada y subida causada por el re-uso de la longitud de onda de bajada para la transmisión de subida [22], [23] aunque las tasas de bits reportadas en esos sistemas no superan los 2.5 Gb/s. El uso de un transceptor de electro absorción con inyección bloqueada (*Injection-locked Electro-AbsorptionTransceiver* - *EAT*), en lugar de un RSOA, mejora la sensibilidad de la transmisión con respecto a la polarización [24] aunque dentro de mi conocimiento, no existen sistemas reportados que hagan uso de esta solución que a su vez superen los 2.5 Gb/s.

En años recientes, el uso de láseres de cavidad vertical y emisión superficial (*Vertical Cavity Surface EmittingLasers* - *VCSELs*) se ha incrementado dado que se trata de un dispositivo de menor costo que puede trabajar como una

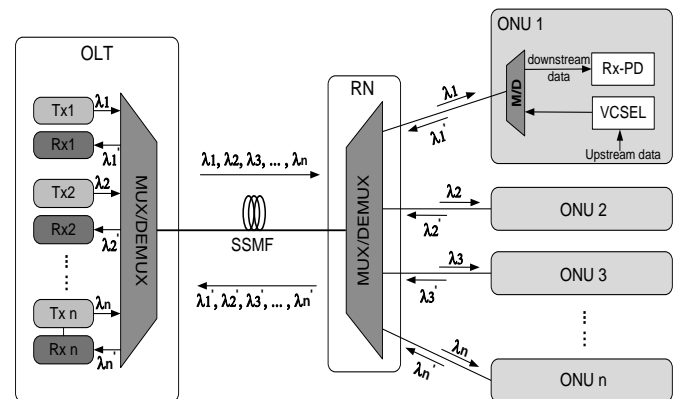


Figura 2. Diagrama esquemático de una WDM-PON con transmisor de ONU basado en un VCSEL.

fuerza de luz sintonizable y que se puede modular directamente. Los VCSELs constituyen una de las alternativas más prometedoras para un despliegue comercial de dispositivos de transmisión sintonizables para usuario final. Un caso bien conocido del uso de VCSELs para transmisiones de 1.25 Gb/s es el caso del proyecto GigaWam (*Gigabit-access-passive-optical-networkusingWavelengthdivisionmultiplexing*) [25].

En el trabajo de descrito en [26] se reporta el empleo de un VCSEL directamente modulado para transmitir a 10 Gb/s sin el empleo de técnicas especiales de modulación o compensación de dispersión a lo largo de una red WDM-PON de 20 km de longitud. En esta red se alcanza tan alta tasa de bits mediante la compensación del desplazamiento en frecuencia que se produce debido al chirp generado por el VCSEL (este tipo de láseres tienen chirp alto en comparación con otros láseres de mejor desempeño). Dicha compensación se realiza mediante un cambio en la frecuencia central de los filtros ópticos, ajustándolos a la variación de frecuencia provocada por el VCSEL. En [27] se analiza las ventajas del uso de un VCSEL sobre un RSOA como fuente de luz en la transmisión uplink en una red PON. La figura 2 muestra una red WDM-PON en la cual las ONUs emplean VCSELs para la transmisión de datos de subida.

3. ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ANCHO DE BANDA

En cualquier situación de las antes escritas, también tiene que tomarse en cuenta los casos en los cuales el número de longitudes de onda disponibles para la transmisión WDM es menor que el número de ONUs existentes en la red. En tal caso el principal problema constituye la asignación de longitudes de onda para garantizar un determinado ancho de banda al usuario (*Wavelength and BandwidthAssignment* - *WBA*) y debido al aumento en la demanda de ancho de banda por parte de los usuarios, es particularmente interesante el estudio de los algoritmos dinámicos de asignación de longitud de onda y ancho de banda (*DynamicWavelength and BandwidthAssignment* - *DWBA*).

Sobre este tema existen muchas investigaciones que se han llevado a cabo y que se han presentado en años recientes, uno de los problemas de interés actual es particularmente el estudio de DWBA gestionada a nivel de cada conexión individual de un mismo usuario (*call-level DWBA*) [28]–[30].

4. COSTOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ÓPTICA

Una de las más grandes ventajas del uso de WDM-PON es la escalabilidad que ofrecen y su muy alta tasa de bits. Sin embargo esto se logra a través de un aumento en la complejidad de la red y por consiguiente un aumento en los costos, lo que significa un problema para la expansión comercial de sistemas de telecomunicaciones basados en esta tecnología. Es así que a su vez muchos trabajos de investigación se han enfocado en el estudio de la optimización de costos de implementación para redes WDM-PON utilizando como variables de la función objetivo el tamaño de la red, el número de equipos intermedios, y la asignación de ancho de banda en función de la disponibilidad de canales y la demanda de los usuarios [31]–[34].

Sobre la base del hecho que las oficinas de un proveedor de servicios están generalmente ya construidas, uno de los enfoques más utilizados para el diseño óptimo de redes PON son las soluciones *greenfield*[33], [35]. Y dado que la reducción de costos es un problema ligado al dimensionamiento óptimo de la red, muchos investigadores afrontan el problema a través de modelos ILP combinados con heurísticas, dado que se trata de problemas del tipo NP-hard, como el que se presenta en [36] el cual se propone una solución para el diseño óptimo de tecnologías PON basadas en árboles con dos niveles jerárquicos en su infraestructura. Otras investigaciones proponen topologías PON multinivel como en [37]–[39] y generalmente sugieren modelos no verificables a través de comparaciones con resultados de software especializado en resolver problemas ILP, esto debido a su complejidad [40]. Otras propuestas hacen uso de modelos MILP (*MixedInteger Linear Programming*) para resolver el problema de la optimización de costos para la implementación de una red PON, como en [41]. En general, los modelos propuestos cubren la implementación de redes del tipo TDM-PON, WDM-PON e híbridas, tomando en consideración las limitaciones físicas de la fibra, tales como la atenuación. Dado que la inclusión de WDM hace más relevantes otros efectos no deseados en la transmisión por fibra óptica tales como las no-linealidades, especialmente a altas tasa de velocidad de transmisión, como 10 Gb/s, algunas investigaciones incluyen la verificación de ese tipo de restricciones en sus modelos [42].

En muchas investigaciones se concluye que la topología más apropiada para lograr un dimensionamiento óptimo de una red PON es la topología tipo árbol extendido multinivel [43], inclusive en las redes del tipo LRPON [44], [45]. En la figura 3 se muestra una comparación entre una topología tipo árbol de un solo nivel versus una tipo árbol multinivel.

5. CLUSTERIZACIÓN ASIMÉTRICA DE USUARIOS

Existen estudios que consideran distribuciones de usuarios heterogéneas y con densidades variables, incluso con mucha distancia de separación entre sí [46], pero muy pocas investigaciones sin embargo hablan de una implementación optimizada en función de una clusterización diferenciada de la región de usuarios a través de técnicas como la teselación de Voronoi, la misma que permite a su vez determinar la ubicación más óptima de los nodos de distribución. Una de ellas es la presentada en [47]. Otro enfoque que casi no se ha explorado es la relevancia que adquieren los efectos no lineales cuando se transmite con la técnica UDWDM, en la cual los canales están separados 10 GHz o menos, tales como FWM; ejemplos a este respecto son la investigación realizada en [48] donde se analiza el efecto de FWM al momento de asignar canales en una red de ese tipo y [42] en la que se incluye el análisis de la restricción impuesta por FWM en el modelo de optimización para el diseño de una red WDM-PON. Sin embargo, dentro de mi conocimiento, ninguna investigación analiza la problemática de la implementación óptima de una red UDWDM-PON considerando técnicas de teselación en la clusterización de usuarios, tomando en consideración restricciones físicas incluidas las no linealidades y otras restricciones tales como la longitud de la fibra, número y costo de equipos, así como la demanda de los usuarios y capacidad de los canales. En la tabla 1 se presenta un resumen del estado del arte de las redes PON, en base a varios de los artículos citados anteriormente.

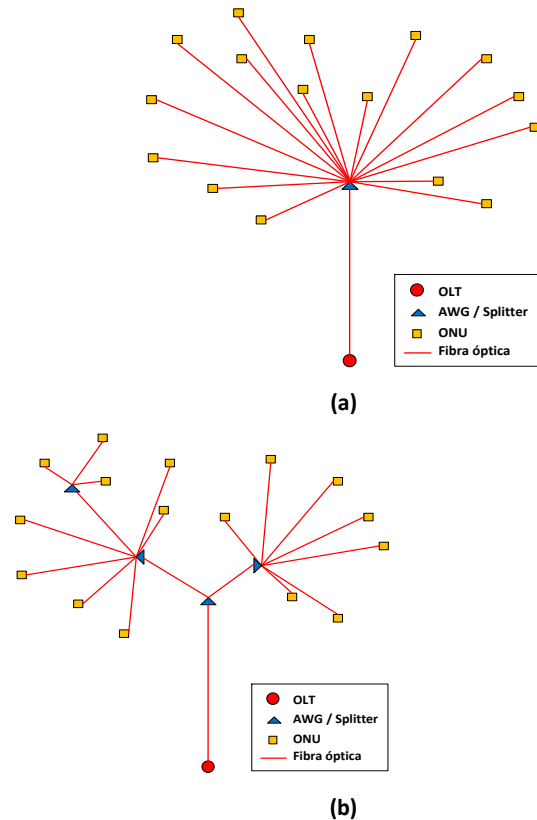


Figura 3. Diagrama esquemático de topologías PON típicas: (a) árbol de un nivel; (b) árbol extendido - multinivel.

Tabla 1. Sumarización del estado actual de las redes PON en base a los artículos citados.

AÑO	DATOS	TIPO DE RED PON					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA						FUNCIONES OBJETIVO				PROPONEN			USAN								
		TDM-PON	HYBRID TDM-WDM-PON	WDM-PON	LRPON	UDWDM-PON	TRANSMISIÓN UPLINK DE BAJO COSTO	ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA Y ANCHO DE BANDA	DIMENSIONAMIENTO EN BASE A TOPOLOGÍA DE DOS NIVELES	DIMENSIONAMIENTO EN BASE A TOPOLOGÍA MULTINIVEL	RESTRICCIONES BASADAS EN LOGITUD Y/O ATENUACIÓN EN LA FIBRA	TIPO, COSTO Y CANTIDAD DE NODOS INTERMEDIOS (AWGs, Splitters)	OTRAS RESTRICCIONES FÍSICAS (DISPERSIÓN Y NO LINEALIDADES)	COSTO DE LA FIBRA	COSTO DE NODOS INTERMEDIOS	NÚMERO DE USUARIOS (CAPACIDAD DE LOS NODOS)	CAPACIDAD /UTILIZACIÓN DE LOS CANALES (DEMANDA DE LOS USUARIOS)	COSTO TOTAL DE IMPLEMENTACIÓN DE LA RED	ILP / MILP	MULTI OBJETIVO	HEURÍSTICA / METAHEURÍSTICA	PROPUESTA DE UN MODELO MATEMÁTICO	TRANSMISORES DE ALTA VELOCIDAD Y DE BAJO COSTO EN ONU	TÉCNICAS DE MODULACIÓN AVANZADA DE BITS	SCHEDULING / WBA / DWBA	CADENAS DE MARKOV	HEURÍSTICAS (PRUFER, PARTICIÓN, DIJKSTRA, STEINER TREE, etc.)	CLUSTERIZACIÓN DIFERENCIADA BASADA EN TESELACIÓN
2008	E.W.M. Wong [28]			X			X	X													X	X						
2009	J. Li 2009 [33]	X						X	X	X		X	X	X		X			X									X
2009	J. Zhang [34]			X				X	X	X		X	X			X			X									X
2010	J. Elbers [3]	X	X			X																X						
2010	C.F. Su [9]			X																		X						
2010	F. Y. Shih [11]			X	X																	X						
2010	L. Zhou [30]		X	X			X		X						X									X				
2010	M.S. Kiaei [32]	X		X			X		X						X		X							X				
2011	B.H. Choi [6]			X		X																X						
2011	C. H. Yeh [10]			X	X		X															X						
2011	Q. Guo [15]			X																			X					
2011	S.H. Cho [21]			X																		X						
2011	T.B. Gibbon [26]			X																		X						
2011	J.S. Vardakas [29]		X					X							X				X					X	X			
2011	M.S. Kiaei [31]	X		X			X		X						X		X		X					X				
2011	Y. Kim [37]	X							X	X	X		X	X		X	X		X									X
2012	E. Wong [5]	X	X	X	X		X															X	X					
2012	K. Lee [8]			X																		X						
2012	L. Li [14]			X																			X					
2012	K. Y. Cho [16]			X	X																	X						
2012	J.M. Joo [17]			X																		X	X					
2012	R. Chowdhury [36]			X					X	X	X		X	X		X	X		X									X
2012	B. Kantarci [38]	X							X	X	X		X	X		X			X									X
2012	A. Eira [39]	X							X	X	X		X	X		X	X		X									X
2012	B. Lin [44]	X			X				X	X	X		X	X		X	X		X									X
2013	S. Francfort [40]	X	X	X					X	X	X		X	X		X	X		X									X
2013	Sloggerenberg[41]	X							X	X	X		X	X		X	X		X									X

20 13	G. Rentao [45]	X							X	X	X		X	X		X	X		X					X	
20 13	A. Mitcsenkov [47]	X	X	X					X	X	X		X	X		X	X		X					X	X
20 14	L. Gouveia [43]	X							X	X	X		X	X		X	X		X					X	
20 14	S. Pal [46]	X			X				X	X	X		X	X		X	X		X					X	
20 14	M. Bi [48]					X						X			X				X			X		X	
20 12	G.V. Arévalo [27]			X			X												X						
20 13	G.V. Arévalo [42]		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X		X					X	

6. CONCLUSIONES

Existe en la actualidad una serie de propuestas de nuevos dispositivos, formatos de transmisión, técnicas de asignación de canal, soluciones de optimización y arquitecturas de red, que buscan hacer óptima y viable la implementación de redes PON de nueva generación. Aquí destacan técnicas de modulación para transmisión a alta tasa de bits con dispositivos de bajo costo, compartición de fuentes amplio ancho de banda, remodulación de la señal descendente, algoritmos de asignación dinámica de longitud de onda y ancho de banda, heurísticas para optimizar el costo de implementación de la red de distribución óptica y técnicas de clusterización en base a teselación. Entre las redes que más se estudian están las LR PON y las WDM PON. Dentro de esta temática existen varios problemas pendientes tales como la propuesta de láseres sintonizables de muy bajo costo, la asignación inteligente de ancho de banda y modelos de optimización de la red que consideren las restricciones físicas de la fibra óptica dentro de sus variables de restricción, tales como impacto de la dispersión y de los efectos no lineales.

REFERENCIAS

[1] A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, G. Kramer, and K. Kim, "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access : a review [Invited]," vol. 4, no. 11, pp. 737-758, 2005.

[2] O. In, "Energy-Efficient Next-Generation Optical Access Networks," no. January, pp. 122-127, 2012.

[3] J. Elbers, "Optical Access Solutions Beyond 10G-EPON / XG-PON," pp. 8-10, 2010.

[4] P. S. A. Tri, "Performance Analysis of Next Generation-PON (NG-PON) Architectures," pp. 339-345.

[5] E. Wong, "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies," J. Light. Technol., vol. 30, no. 4, pp. 597-608, Feb. 2012.

[6] B.-H. Choi and S. S. Lee, "The effect of AWG-filtering on a bidirectional WDM-PON link with spectrum-sliced signals and wavelength-reused signals," Opt. Commun., vol. 284, no. 24, pp. 5692-5696, Dec. 2011.

[7] D. Nasset, "Network Operator Perspective on WDM-PON Systems and Applications," 37th Eur. Conf. Expo. Opt. Commun., no. 1, p. Th.12.C.6, 2011.

[8] K. Lee, S. Do Lim, Y. M. Jhon, C. H. Kim, P. Ghelfi, A. T. Nguyen, L. Poti, and S. B. Lee, "Broadcasting in colorless WDM-PON using spectrum-sliced wavelength conversion," Opt. Fiber Technol., vol. 18, no. 2, pp. 112-116, Mar. 2012.

[9] C.-F. Su, L. Wang, S.-K. Liaw, and Y.-S. Huang, "A colorless WDM-PON system using multi-wavelength light sources for optically-injection-locked transmitters," Opt. Fiber Technol., vol. 16, no. 1, pp. 1-4, Jan. 2010.

[10] C. H. Yeh, C. W. Chow, Y. F. Wu, F. Y. Shih, and S. Chi, "Using Fabry-Perot laser diode and reflective semiconductor optical amplifier for long reach WDM-PON system," Opt. Commun., vol. 284, no. 21, pp. 5148-5152, Oct. 2011.

[11] F. Y. Shih, C. H. Yeh, C. W. Chow, C. H. Wang, and S. Chi, "Utilization of self-injection Fabry-Perot laser diode for long-reach WDM-PON," Opt. Fiber Technol., vol. 16, no. 1, pp. 46-49, Jan. 2010.

[12] C. H. Yeh, C. W. Chow, and S. Chi, "Using 10 Gb/s remodulation DPSK signal in self-restored colorless WDM-PON system," Opt. Fiber Technol., vol. 15, no. 3, pp. 274-278, Jun. 2009.

[13] H.-D. Jung, N.-C. Tran, C. Okonkwo, E. Tangdiongga, and T. Koonen, "10Gb/s Bi-Directional Symmetric WDM-PON System Based on POLMUX Technique with Polarization Insensitive ONU," Natl. Fiber Opt. Eng. Conf., p. JThA27, 2010.

[14] L. Li, J. Zhang, D. Duan, and A. Yin, "Analysis modulation formats of DQPSK in WDM-PON system," Opt. - Int. J. Light Electron Opt., vol. 123, no. 22, pp. 2050-2055, Nov. 2012.

[15] Q. Guo and A. V. Tran, "20-Gb/s Single-Feeder WDM-PON Using Partial-Response Maximum Likelihood Equalizer," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 23, no. 23, pp. 1802-1804, Dec. 2011.

[16] K. Y. Cho, S. Member, U. H. Hong, M. Suzuki, and Y. C. Chung, "103-Gb / s Long-Reach WDM PON Implemented by Using Directly Modulated RSOAs," vol. 24, no. 3, pp. 2011-2013, 2012.

[17] J.-M. Joo, M.-K. Hong, D. T. Pham, C. J. Youn, Y.-H. Kwon, E.-S. Nam, and S.-K. Han, "19-Gb/s adaptively modulated optical OFDM transmission by separated I/Q baseband delivery using 1GHz RSOAs," Opt. Fiber Technol., vol. 18, no. 1, pp. 34-38, Jan. 2012.

[18] C. H. Yeh and C. W. Chow, "Utilization of four WDM channels with signal remodulation of OFDM-QAM for 10Gb/s uplink passive optical networks," Opt. Commun., vol. 282, no. 18, pp. 3701-3705, Sep. 2009.

[19] B. Wu and Z. Zhang, "Applications of Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing in Optical Access Network," Procedia Environ. Sci., vol. 10, pp. 1199-1204, Jan. 2011.

[20] S.-H. Cho, S.-S. Lee, and D.-W. Shin, "Improving upstream transmission performance using a receiver with decision threshold level adjustment in a loopback WDM-PON," Opt. Fiber Technol., vol. 16, no. 3, pp. 129-134, Jun. 2010.

- [21] S.-H. Cho, S.-S. Lee, and D.-W. Shin, "Impact of wavelength detuning on upstream transmission in a loop-back WDM-PON based on reflective-SOA," *Opt. Commun.*, vol. 284, no. 7, pp. 1951–1954, Apr. 2011.
- [22] Y.-Y. Won, D.-H. Kim, Y.-X. Piao, S.-J. Park, and S.-K. Han, "1.25-Gb/s bidirectional colorless WDM-PON based on RSOA using subcarrier detection and optical carrier suppression," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 141–144, Mar. 2009.
- [23] Z. A. El-sahn, J. M. Buset, and D. V. Plant, "Overlapped-Subcarrier Multiplexing for WDM Passive Optical Networks: Experimental Verification and Mathematical Analysis," vol. 30, no. 5, pp. 754–763, 2012.
- [24] S.-C. An, H.-S. Kim, Y.-Y. Won, and S.-K. Han, "Colorless gigabit WDM-PON link using injection locking and electro-absorption transceiver," *Opt. Commun.*, vol. 284, no. 6, pp. 1526–1531, Mar. 2011.
- [25] K. Prince, T. B. Gibbon, R. Rodes, E. Hviid, C. I. Mikkelsen, C. Neumeyr, M. Ortsiefer, E. Rönneberg, J. Roskopf, P. Öhlén, E. In De Betou, B. Stoltz, E. Goobar, J. Olsson, R. Fletcher, C. Abbott, M. Rask, N. Plappert, G. Vollrath, and I. T. Monroy, "Enabling Gigabit Per-User Data Bandwidth," no. c, 2011.
- [26] T. B. Gibbon, K. Prince, T. T. Pham, a. Tatarczak, C. Neumeyr, E. Rönneberg, M. Ortsiefer, and I. T. Monroy, "VCSEL transmission at 10Gb/s for 20km single mode fiber WDM-PON without dispersion compensation or injection locking," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 41–45, Jan. 2011.
- [27] G. Arévalo and D. Cárdenas, "Advantages of the use of VCSEL over RSOA for uplink transmission on WDM-PON networks," *IEEE LATINCOM conferences*, 2012.
- [28] E. W. M. Wong and S. Chan, "Dynamic Wavelength Allocation Schemes in WDM-PON," 2008.
- [29] J. S. Vardakas, I. D. Moscholios, M. D. Logothetis, and V. G. Stylianakis, "An Analytical Approach for Dynamic Wavelength Allocation in WDM – TDMA PONs Servicing ON – OFF Traffic," vol. 3, no. 4, 2011.
- [30] L. Zhou, X. Cheng, Y. Yeo, and L. H. Ngoh, "Hybrid WDM-TDM PON Architectures and DWBA Algorithms," *Communications and Networking in China (CHINACOM)*, 2010
- [31] M. S. Kiaei, C. Assi, L. Meng, and M. Maier, "On the Co-Existence of 10G-EPONs and WDM-PONs: A Scheduling and Bandwidth Allocation Approach," *J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 10, pp. 1417–1426, 2011.
- [32] M. S. Kiaei, L. Meng, C. Assi, and M. Maier, "Efficient Scheduling and Grant Sizing Methods for WDM PONs," *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 13, pp. 1922–1931, 2010.
- [33] J. Li and G. Shen, "Cost Minimization Planning for Greenfield Passive Optical Networks," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 17–29, Jun. 2009.
- [34] J. Zhang and N. Ansari, "Minimizing the Arrayed Waveguide Grating Cost and the Optical Cable Cost in Deploying WDM Passive Optical Networks," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 1, no. 5, pp. 352–365, Oct. 2009.
- [35] M. Morrow and K. Vijayananda, "Providers: Opportunities and Challenges (Chapter 3)."
- [36] R. Chowdhury and B. Jaumard, "A cross layer optimization scheme for WDM PON network design and dimensioning," *2012 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 3110–3115, Jun. 2012.
- [37] Y. Kim, Y. Lee, and J. Han, "A splitter location-allocation problem in designing fiber optic access networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 210, no. 2, pp. 425–435, Apr. 2011.
- [38] B. Kantarci and H. T. Mouftah, "Availability and Cost-Constrained Long-Reach Passive Optical Network Planning," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 61, no. 1, pp. 113–124, Mar. 2012.
- [39] A. Eira, J. Pedro, and J. Pires, "Optimized design of multistage passive optical networks," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 4, no. 5, pp. 402–411, May 2012.
- [40] S. Francfort and M. Chardy, "Real life cable constraints in designing Passive Optical Network architecture," vol. 0, pp. 337–339, 2013.
- [41] S. P. van Loggerenberg, M. J. Grobler, and S. E. Terblanche, "Solving the Passive Optical Network with Fiber Duct Sharing Planning Problem Using Discrete Techniques," *Electron. Notes Discret. Math.*, vol. 41, pp. 343–350, Jun. 2013.
- [42] G. V. Arévalo, J. E. Sierra, and R. C. Hincapi, "ILP Model for Greenfield WDM PON Network Design Based," vol. 33, no. 0.
- [43] L. Gouveia, M. J. Lopes, and A. de Sousa, "Single PON network design with unconstrained splitting stages," *Eur. J. Oper. Res.*, Jul. 2014.
- [44] B. Lin, L. Lin, and P.-H. Ho, "Cascaded Splitter Topology Optimization in LRPNs," pp. 3105–3109, 2012.
- [45] G. Rentao, L. Xiaoxu, L. Hui, and B. Lin, "Evolutional algorithm based cascade long reach passive optical networks planning," *Commun. China*, vol. 10, no. 4, pp. 59–69, Apr. 2013.
- [46] S. Pal, C. Zukowski, A. Nag, D. B. Payne, and M. Ruffini, "Cable Length Minimisation in Long-Reach-PON Planning for Sparsely Populated Areas," pp. 19–22, 2014.
- [47] A. Mitcsenkov, P. Bakos, G. Paksy, and T. Cinkler, "Technology-independent Topology Design Heuristics for Point-to-Multipoint Optical Access Networks," pp. 298–303, 2013.
- [48] M. Bi, S. Xiao, J. Li and H. He, "A bandwidth-efficient channel allocation scheme for mitigating FWM in ultra-dense WDM-PON" *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, pp. 1957–1961, 2014.