

# Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones

Elastic optical networks: a new paradigm for future telecommunications networks

Redes ópticas elásticas: um novo paradigma nas futuras redes de telecomunicações

Jhon James Granada-Torres<sup>1</sup>, Ana María Cárdenas-Soto<sup>2</sup>, Neil Guerrero-González<sup>3</sup>

**Forma de citar:** J.J. Granada-Torres, A. M. Cárdenas-Soto, N. Guerrero-González, “Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones”, *Respuestas*, vol. 20, no. 2, pp. 6-22, 2015.

## Resumen

Recibido:  
Diciembre 15 de 2014

Aceptado:  
Junio 1 de 2015

El tráfico en las redes de datos por fibra óptica ha tenido un crecimiento exponencial debido a la creciente demanda de información por parte de los usuarios finales, llevando a una saturación en la capacidad de las redes actuales. Proyectando los sistemas de transmisiones ópticas a tasas superiores a los 400 Gbps para redes de largo alcance, no será posible mantener la tecnología WDM de rejilla espectral fija de 50 GHz, la cual permite transmitir en la actualidad tasas hasta los 100 Gbps. Teniendo como limitación además del ancho espectral que ocuparía la información, la conmutación de los dispositivos para trabajar a altas frecuencias. En este contexto, surge el concepto de las redes ópticas elásticas, donde se emplea una rejilla de espectro flexible (flexi-grid) o sin rejilla (grid-less), con ancho espectral variable por canal según la demanda de ancho de banda, permitiendo una separación espectral flexible entre canales con el propósito de optimizar la eficiencia en el uso del espectro. Este artículo hace una revisión de los nuevos conceptos tecnológicos que conllevan el escenario de redes elásticas, y los posibles retos y limitaciones para el desarrollo de estas tecnologías. Recientes pruebas experimentales incorporan nuevos conceptos tecnológicos con relación a los ya comerciales sistemas de 100-G como: el diseño de transmisores multicanales, el uso de tecnologías como Nyquist-WDM y OFDM óptico flexible, receptores digitales coherentes reconfigurables, formatos de modulación m-arios e híbridos y asignación dinámica del espectro. No obstante, grandes limitantes como los efectos no lineales de la fibra óptica deben ser foco de investigación en este nuevo escenario, debido a sus efectos en la degradación de la señal. Finalmente, se muestra como las técnicas de procesamiento digital de señales desempeñarán un papel importante para lograr la reconfigurabilidad y elasticidad de las redes de alta capacidad.

**Palabras clave:** Comunicaciones por Fibra Óptica, Enrutamiento, Interferencia Intercanal (ICI), Multiplexación por División de Longitud de Onda, Óptica No-Lineal, Procesamiento Digital de Señales (DSP), Redes Ópticas.

## Abstract

In the last years, traffic on data optical networks has had an exponential growth due to the increasing demand of information by end users. This had lead to saturation of the current

<sup>1</sup>Maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones  
jhon.granada@udea.edu.co  
ORCID: 0000-0003-3741-2618  
Universidad de Antioquia  
Medellín-Colombia

<sup>2</sup>Doctorado en Telecomunicaciones  
ana.cardenas@udea.edu.co  
ORCID: 0000-0001-9152-8246  
Universidad de Antioquia  
Medellín-Colombia

<sup>3</sup>Doctorado en Fotónica  
neil.gonzalez@tyndall.ie  
ORCID: 0000-0002-8053-6280  
Tyndall National Institute  
Cork-Irlanda

deployed networks in terms of capacity. Planning the optical transmission systems of long-reach to work with capacities above 400 Gbps, it will not be possible to keep the spectral fixed-grid of the WDM technology, which currently allows transmitting up to 100 Gbps. The principal limitation is due to the greater spectral bandwidth occupied by the data information and also due to the switching of electronics devices at high frequencies. In this context a new concept known as elastic optical network emerges, which proposes a flexible-grid or gridless, where the spectral width changes according to the bandwidth demand and allows optimizing the spectral efficiency with a minimum separation between adjacent channels. In this paper, we present a comprehensive survey of elastic optical networks, introducing new concepts and describing the challenges and the limitations in these networks. Recent experimental reports show new technological concepts related to the commercial 100-G systems such as: design of multichannels transmitters, gridless Nyquist-WDM and Optical-OFDM, reconfigurable digital coherent receivers, optical dynamic spectrum allocation and advanced modulation formats. Nevertheless, the non-linearity effects of the optical fiber are a significant limitation that must be researched in detail in this new elastic scenario. Hence, it is shown how the digital signal processing techniques are going to play an important role in order to get high capacity in elastic and reconfigurable networks.

**Keywords:** Optical Fiber Communications, Routing, Interchannel Interference (ICI), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Nonlinear Optics, Digital Signal Processing (DSP), All-Optical Networks.

### Resumo

O tráfego nas redes de dados por fibra óptica tem tido um crescimento exponencial devido à crescente demanda de informação por parte dos usuários finais, levando a uma saturação na capacidade das redes atuais. Projetando os sistemas de transmissões ópticas a taxas superiores aos 400 Gbps para redes de longo alcance, não será possível manter a tecnologia WDM de grelha fixa espectral de 50 GHz, a qual permite transmitir na atualidade taxas até os 100 Gbps. Tendo como limitação ademais da largura espectral que ocuparia a informação, a comutação dos dispositivos para trabalhar a altas frequências. Neste contexto, surge o conceito das redes ópticas elásticas, onde se emprega uma grelha de espectro flexível (flexi-grid) ou sem grelha (grid-less), com largura espectral variável por canal segundo a demanda da largura de banda, permitindo uma separação espectral flexível entre canais com o propósito de otimizar a eficiência no uso do espectro. Este artigo faz uma revisão dos novos conceitos tecnológicos que envolvam o cenário de redes elásticas, e os possíveis desafios e limitações para o desenvolvimento destas tecnologias. Recentes provas experimentais incorporam novos conceitos tecnológicos com relação aos já comerciais sistemas de 100-G como: o design de transmissores multicanaís, o uso de tecnologias como Nyquist-WDM e OFDM óptico flexível, receptores digitais coerentes reconfiguráveis, formatos de modulação *M*-ária e híbridos, e assinação dinâmica do espectro. Não obstante, grandes limitantes como os efeitos não lineares da fibra óptica devem ser foco de pesquisa neste novo cenário, devido a sus efeitos na degradação do sinal. Finalmente, mostra-se como as técnicas de processamento de sinal digital irá desempenhar um papel importante na realização do restabelecimento e flexibilidade de redes de alta capacidade.

**Palavras-chave:** Comunicações por Fibra Óptica, Interferência Entre Canais (IEC), Multiplexação por Divisão de Longitude de Onda, Óptica Não-Lineal, Processamento Digital de Sinais (PDS), Redes Ópticas, Routing.

## 1. Introducción

El incremento en la capacidad y la mejora en la eficiencia de las redes de transporte ópticas ha sido un reto importante de investigación por muchos años [1]. La demanda imparable de diversos servicios de telecomunicaciones como computación en la nube, computación *grid*, video sobre demanda, transmisiones de video en alta definición, entre otros, exige brindarle mayor ancho de banda a los usuarios finales, los cuales han llevado a que el tráfico de datos crezca de manera exponencial en los últimos años, y se prevé que se requerirán transmisiones en el rango de los Terabits en un futuro cercano para redes metro e incluso de acceso [2], [3].

Para enfrentar el incremento del tráfico de datos de la última década, en un comienzo las investigaciones se enfocaron en el desarrollo de formatos de modulación avanzada y ecualización digital en el dominio eléctrico para permitir capacidades por canal superiores a los 100 Gbps con mejoras en las distancias de transmisión para sistemas tradicionales WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [4], [5]. Sin embargo, a pesar de las altas tasas de transmisión que se pueden alcanzar en redes WDM, su granularidad rígida conlleva a una utilización ineficiente de la capacidad de la red. Las redes actuales basadas en WDM estandarizadas por la ITU-T, no permiten la transmisión de tasas superiores a los 100 Gbps en cada uno de sus canales debido al diseño de los dispositivos de la red que operan sobre rejillas de espectro fijo (*fixed-grid*, separación de 50 GHz), lo que se convierte en un problema significativo en el desarrollo de canales de alta capacidad [6]-[8]. Pensar en ampliar la granularidad de la rejilla no sería una solución óptima si también se necesita transmitir tasas inferiores, llevando a un uso ineficiente del espectro. Una alternativa para ajustarse a la rejilla fija, es la implementación de formatos de modulación de grandes constelaciones como 1024-QAM

[6], sin embargo el requerimiento de una alta relación señal a ruido óptica (OSNR, *Optical Signal to Noise Ratio*) necesaria para el procesamiento de la señal, restringe su uso a distancias cortas. Por tal razón, una red óptica con rejilla espectral flexible (*flexi-grid*) sería una solución viable, donde se envíe la información con un ancho espectral suficiente y ajustable a la capacidad de información que se desee transmitir, evitando tener ancho de banda ocioso y desperdiciar espectro en las bandas de guarda entre canales adyacentes [9].

Las redes flexibles, propuestas en [10] y estandarizadas por la ITU [11], han sido ampliamente debatidas por la comunidad científica. Sin embargo, algunas tecnologías habilitadoras aún están en desarrollo como los *transponders* flexibles y los multiplexores reconfigurables (ROADM, *Reconfigurable optical add drop multiplexer*) con granularidades del orden de 12.5 GHz [12].

Dentro de las tecnologías propuestas para hacer un uso eficiente y óptimo del espectro, se encuentran CO-OFDM (*Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y Nyquist-WDM, las cuales permiten enviar canales con un espaciamiento ideal igual a la tasa de baudío. No obstante, CO-OFDM requiere estrictamente un pulso rectangular perfecto en el tiempo y un receptor con un ancho de banda y conversores análogos-digitales de respuesta más rápida a los desarrollados en la actualidad [13]. Por su parte, Nyquist-WDM requiere un pulso de Nyquist que representa un rectángulo ideal en el espectro con un ancho de banda igual a la tasa de baudíos [1], [5], [6], [14], sin embargo son características no logrables en la práctica, debido a las limitaciones del filtro digital, ya que requeriría un número ilimitado de taps en el convertor digital análogo (DAC, *Digital-to-Analog Converter*).

De esta manera, una de las alternativas a explorar es trabajar con transmisión de múltiples portadoras ópticas con escasa banda de guarda para transportar altas tasas de transmisión, lo cual conlleva a la generación de *crosstalk* lineal y no lineal entre los canales adyacentes. Ambos efectos se denominan como interferencia intercanal (ICI, *Interchannel Interference*). El *crosstalk* lineal se relaciona con el solapamiento de canales por la disminución de la banda de guarda entre ellos. De otro lado aparece el *crosstalk* no lineal debido a los efectos no lineales de la fibra óptica. En particular, las no linealidades como la modulación de auto-fase (SPM, *Self-phase modulation*), Modulación por cruce de fase (XPM, *Cross-Phase Modulation*) y mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four-Wave Mixing*) producidos por el efecto óptico *Kerr*, se presentan en transmisiones multicanal, y dependen directa o indirectamente de la dispersión cromática de la fibra y de la intensidad de potencia [15]. Optimizar el uso del espectro ajustando el espaciado entre canales en una rejilla de espectro flexible utilizando múltiples portadoras intensifica los efectos de la ICI, distorsionando las señales que viajan en cada portadora óptica.

En este artículo se realiza una revisión conceptual y de estado del arte desde el avance en redes de transmisión a altas tasas de transmisión y la posible migración a las redes elásticas. Además, de la identificación de los diferentes problemas de la fibra óptica y el posible impacto que tendría en un escenario multiportadora con flexibilidad espectral. El artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 muestra el avance de las redes ópticas desde WDM con rejilla fija, hasta las redes multiportadora con rejilla flexible, describiendo los nuevos conceptos que conlleva el nuevo paradigma de las redes ópticas elásticas. La sección 3 identifica las limitaciones dadas por la fibra óptica y la importancia del procesamiento digital de señales en los sistemas de ópticos

multiportadora en un escenario de redes elásticas, y finalmente las conclusiones se presentan en la sección 4.

## 2. Hacia las redes ópticas elásticas

El camino hacia redes elásticas parte de conocer las actuales características de las redes WDM y considerar aquellas que serían necesarias para habilitar la elasticidad en dichas redes.

### 2.1 Evolución del clásico WDM

Las redes de nueva generación se prevén como sistemas altamente heterogéneos debido a los diferentes servicios, formatos de modulación, tasas de bit y a las interfaces involucradas en la red de transporte óptico [1]. A finales del siglo pasado, la tecnología WDM surgió para abastecer las necesidades de capacidad de la época, y posteriormente, esta misma tecnología evolucionó, permitiendo el desarrollo de canales con capacidad de 40 Gbps, y hasta los últimos dispositivos comercialmente disponibles de 100 Gbps [2], [3].

Un sistema WDM transmite múltiples canales de información por una misma fibra, teniendo cada canal una longitud de onda determinada como se muestra en la figura 1. Los sistemas WDM tienen un multiplexor en el lado donde se ubican los distintos transmisores (uno por cada longitud de onda), para unir sus señales ópticas que son enviadas por un hilo de fibra y separarlas en el receptor por medio de un demultiplexor. Un multiplexor reconfigurable óptico (ROADM, *Reconfigurable optical add drop multiplexer*) es el dispositivo encargado de la multiplexación y demultiplexación en redes WDM ópticas actualmente, permitiendo tener una configuración remota [3]. Gracias a un interruptor/conmutador interno seleccionador de longitud de onda (WSS, *Wavelength Selective Switch*) se permite a una o múltiples longitudes de onda ser insertadas o extraídas (*add/drop*) de la fibra

sin la necesidad de convertir todos los canales al dominio electrónico y luego al dominio óptico de nuevo [16], [17].

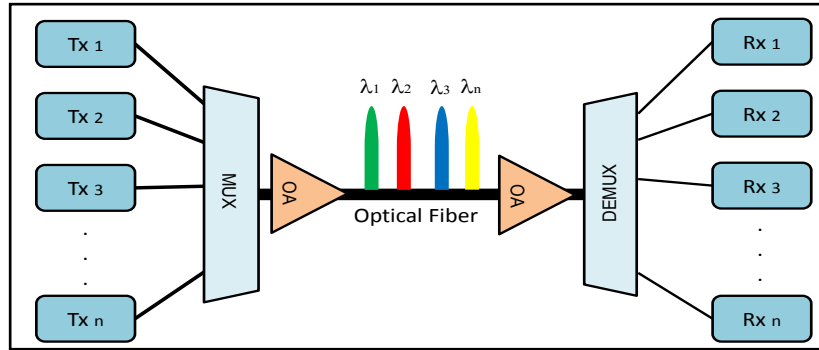


Figura 1. Red WDM. Tx: Transmisor. Mux: Multiplexor. OA: Amplificador Óptico. Rx: Receptor.  $\lambda$ : Longitud de onda.  
Fuente: Autores

Los sistemas WDM actuales operan con rejillas fijas, típicamente con separación entre canales de 50 GHz según el estándar de la ITU-T G.694.1, restringiendo el ancho espectral de cada canal, el cual además debe tener una banda de guarda para evitar interferencia con canales adyacentes [2].

Para aumentar la capacidad de transmisión, con tasas de bit por canal superiores a los 100 Gbps, se ha propuesto aumentar la eficiencia espectral. Primero, por medio de los formatos de modulación, aumentando la cantidad de símbolos por unidad de tiempo, logrando superar al estandarizado QPSK con el formato 16-QAM [18]. Para interfaces de 1 Tbps, en principio como una posible solución, se propusieron formatos de modulación de grandes constelaciones como 1024-QAM de múltiples canales de una portadora [6]. No obstante, el aumento de formatos de modulación está restringido por el fuerte incremento de la penalidad de potencia debido a la necesidad de tener una alta OSNR para el procesamiento de la señal, lo que a su vez restringe al sistema a lograr transmisiones de pocos kilómetros. Por otro lado, aumentar la potencia de transmisión no es una solución viable debido a que se aumentan los efectos no lineales propios de la fibra óptica que afectan la transmisión. Adicionalmente, la tendencia es tener redes eficientes en el consumo de potencia siguiendo la línea de las tecnologías

“Green” [2], [19]-[23]. De esta manera, se convierte en un reto importante optimizar los recursos de la red haciendo asignaciones de ancho de banda de manera dinámica por parte de los transmisores e interfaces de la red como los *transponders* (transmisor/receptor), pudiendo modificar los formatos de modulación con base en los parámetros de desempeño de la red [24].

Soportar el tráfico de la red mediante un gran número de canales puede ocasionar pérdida de gran cantidad de recursos espectrales en términos de bandas de guarda. Para encarar este reto se proponen redes con rejillas del espectro flexibles (*flexi-grid*), en lugar de rejillas fijas (*fixed-grid*), actualizando el estándar G.694.1 de la ITU-T de 2002, en el año 2012 [6], [20]-[23] (ver figura 2). Esta actualización apunta hacia el concepto de las redes ópticas elásticas [1], donde la rejilla flexible permitiría una mayor eficiencia del espectro, y además, se aprovecharían óptimamente los recursos de la red, por ejemplo, evitando desperdiciar energía en la amplificación de canales que no llevan información, lo que permite una reducción del costo por bit transmitido. La flexibilidad de la rejilla no se circunscribe sólo al ajuste del ancho espectral, sino a la integración de dos o más canales adyacentes que pertenezcan al mismo usuario final, lo que se conoce como Supercanales.



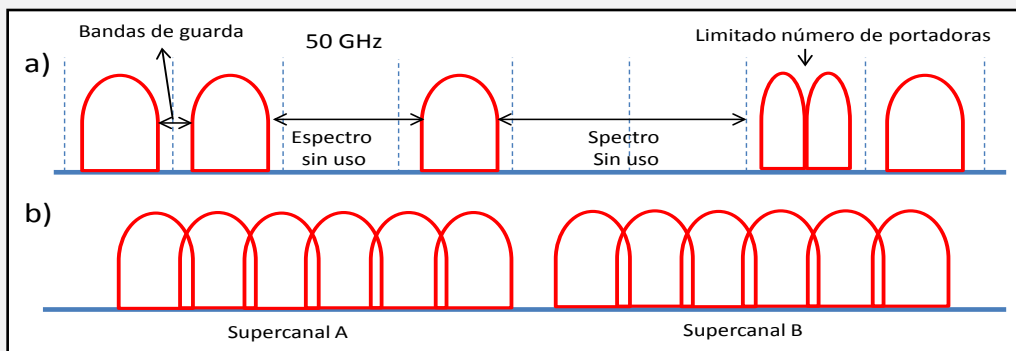


Figura 2. Rejilla del espectro en redes WDM a) fija y b) flexible  
 Fuente: Autores

## 2.2 Tecnologías para la implementación de las redes elásticas

Para hacer la implementación de elasticidad en la red se han propuesto tecnologías basadas en O-OFDM (*Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y en WDM ultradenso (por ejemplo Nyquist-WDM).

OFDM es una tecnología prometedora para transmisiones de alta velocidad [19], que tiene características intrínsecas de flexibilidad, razones que condujeron a que fuera considerada para la implementación de redes ópticas de alta capacidad. Esta tecnología ha sido ampliamente adoptada por estándares inalámbricos y cableados tales como 802.11a/g Wi-Fi, 802.16 WiMAX, LTE (*Long-Term Evolution*), DAB y DVB (*Digital Audio and Video Broadcasting*), y DSL (*Digital Subscriber Loop*). OFDM es una clase especial de esquema de modulación multiportadora que transmite un flujo de datos a alta velocidad dividido dentro de cierto número de canales ortogonales, llamados subportadoras. En el espectro, estas subportadoras se traslapan sin interferir gracias a su ortogonalidad. En su aplicación en redes ópticas, se ha demostrado transmisiones con supercanales O-OFDM generados con un grupo de portadoras espaciadas a 12.5 GHz que lograron alcances de 4000 km, 2500 km, 1200 km, 800 km and 400 km para 1, 2, 4, 5 y 6 bits por símbolo respectivamente [22].

Por otro lado, Nyquist-WDM (N-WDM) se basa en el uso de pulsos ópticos teniendo un espectro rectangular, con un ancho de banda igual a la tasa de símbolos [1], [5]. N-WDM tiene un rendimiento similar a O-OFDM, sin embargo O-OFDM requiere receptores con anchos de banda más grandes y conversores análogo-digital más veloces en respuesta, por lo cual N-WDM es mucho más robusto a la hora de implementarse según las restricciones del receptor, y la complejidad de los equipos [24]. Se ha demostrado transmisiones para formatos de modulación 6 x 64-QAM N-WDM con multiplexación de polarización (PDM), sobre 80 km de distancia, teniendo una eficiencia espectral de 10 bits/s/Hz usando pre-ecualización en el transmisor y ecualización en el receptor [14]. También se realizaron pruebas experimentales sobre redes existentes de 1750 km con PDM-QPSK 8 x 216.8-Gbps N-WDM [25]. En [26] simulan una transmisión N-WDM con supresión de ruido y O-OFDM sin bandas de guarda, logrando transmisiones de 2800 km y 3200 km respectivamente a 100 Gbps por canal. Recientes investigaciones muestran transmisiones en el rango de los terabits, con modulación 16-QAM hasta los ~3300 km, con separación espectral entre canales de factor 1.2 la tasa de baudios en Hz [27]. Uno de los aspectos claves de la implementación de la elasticidad recae en los *transponders*, pues son los que permiten la adaptación de los parámetros de los transmisores y receptores a

las necesidades impuestas por la demanda y las condiciones del canal.

### 2.3 Reconfigurabilidad de los *Transponders*

Además de obtener mayores capacidades de transmisión, los sistemas multiportadora elásticos podrían permitir que diferentes características como la tasa de bits, la eficiencia espectral y el consumo de energía sean ajustados para diferentes enlaces ópticos de acuerdo con la demanda de tráfico, mediante *transponders* flexibles, los cuales incorporan módulos de DSP en su receptor coherente. Un *transponder* es el dispositivo de la red que hace el papel de transmisor y receptor según el flujo de la información. Actualmente funcionan a una tasa de bit determinada en una rejilla espectral fija. Entre los parámetros que se podrían variar en un *transponder* flexible, estarían los siguientes parámetros: el número de portadoras, el formato del pulso, la modulación de cada portadora, la tasa de símbolo por portadora, y el tipo de codificación utilizado. Para explorar todo el potencial de los *transponders* flexibles, estos equipos también deben ser capaces de extraer a partir de los datos recibidos, una gran cantidad de información sobre el enlace óptico. El intercambio de información entre la transmisión y la recepción usando DSP, permite el uso de técnicas avanzadas para mitigar degradaciones lineales y no lineales como se mencionará en la sección III y la asignación dinámica del espectro [28]-[30]. La flexibilidad de operación, junto con la capacidad de estimación de las características del sistema, posibilitará que *transponders* flexibles sean elementos centrales en redes con topologías dinámicas, tales como las redes definidas por software [22].

### 2.4 Asignación dinámica del espectro y modulación adaptativa

En sus inicios las redes ópticas transmitían la información usando formatos de modulación en amplitud (ASK, *Amplitude-Shift-Keying*).

Luego, con la detección coherente, se desplegó la modulación de fase QPSK (*Quadrature-Phase-Shift-Keying*), gracias a sus ventajas como la tolerancia a la dispersión de la fibra, y se espera el despliegue de los más recientes formatos tipo n-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). El aumento del formato de modulación significa un incremento en la tasa de bits. No obstante, cualquiera sea la topología de red, se debe asegurar que todos los enlaces tengan una relación señal a ruido suficiente que permita una tasa de error de bit adecuada a los requerimientos de la aplicación. Esto significa que la transmisión debe tener robustez ante las imperfecciones del sistema, independiente de la longitud del enlace, y la capacidad de información a transmitir.

Por lo anterior, surge un nuevo concepto de asignación espectral adaptativa de acuerdo con la distancia. Esta asignación inteligente, se basa en la optimización de los recursos espectrales, variando el número de bit por símbolo modulados para ajustarse al desempeño de la red producto de una demanda y/o distancia del enlace variable. Por ejemplo, desde QPSK (2 bits por símbolo) hasta 16-QAM (4 bits por símbolo), se reduce la ocupación del espectro a la mitad (ver figura 3), y desde QPSK hasta 64-QAM se reduciría la tercera parte. El incremento del formato de modulación está acompañado por la reducción de la tasa de símbolo, manteniendo fija la tasa de bit, y como se ha mencionado, en la disminución del alcance o longitud del enlace. Esta asignación dinámica del espectro cambiando los formatos de modulación, es diferente a los casos tradicionales inalámbricos donde se varía la tasa de bit o el número de subportadoras. No obstante, la posibilidad de aumentar o disminuir el número de subportadoras ópticas también será parte de las futuras redes ópticas elásticas, de acuerdo con la demanda del ancho de banda.

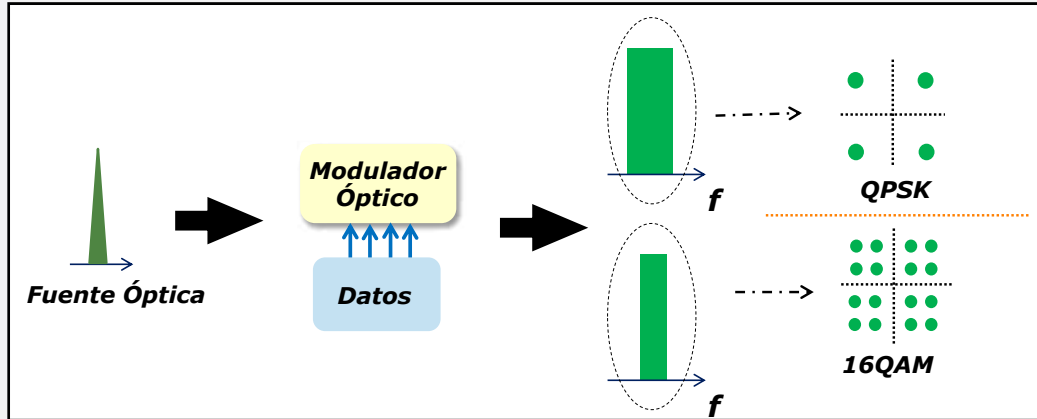


Figura 3. Espectro óptico QPSK y 16-QAM para igual tasa de bit.  
Fuente: Autores

### 2.5 Reconfiguración del espaciamiento entre canales y asignación dinámica de rutas

La figura 4 es un ejemplo de topología de red óptica elástica, donde se puede observar cómo cambian los conjuntos de longitudes de onda (distinguidas por colores) entre los nodos origen y destino. Esto posibilita a la red entera reutilizar longitudes de onda en algunas trayectorias donde no se utilizan y asignarlas de manera eficiente en la etapa de diseño de la red o por alguna falla presentada como cortes de fibra óptica o fallas en los dispositivos de toda la trayectoria implicada. En el contexto de los Supercanales, esta función debe habilitarse para optimizar el uso de los recursos de la red óptica como el ancho de banda y las longitudes de onda, y un dispositivo que

puede cubrir tales requerimientos son los conversores de longitud de onda netamente ópticos [31]. Estos conversores tienen la capacidad de enrutar longitudes de onda sin recurrir a la conversión óptica-eléctrica-óptica y además tienen la capacidad de reconfigurar el espaciamiento entre canales que es una característica propia de la dinámica de los Supercanales. La reconfigurabilidad posibilita asignar las subportadoras de acuerdo con la demanda del usuario, permitiendo que las longitudes de onda no utilizadas se asignen para conformar otro Supercanal. Esto da como resultado un uso eficiente del ancho de banda de la fibra óptica y una disminución en el consumo de energía de la red, optimizando la eficiencia energética, lo que a su vez permite la reducción del costo por bit transmitido.

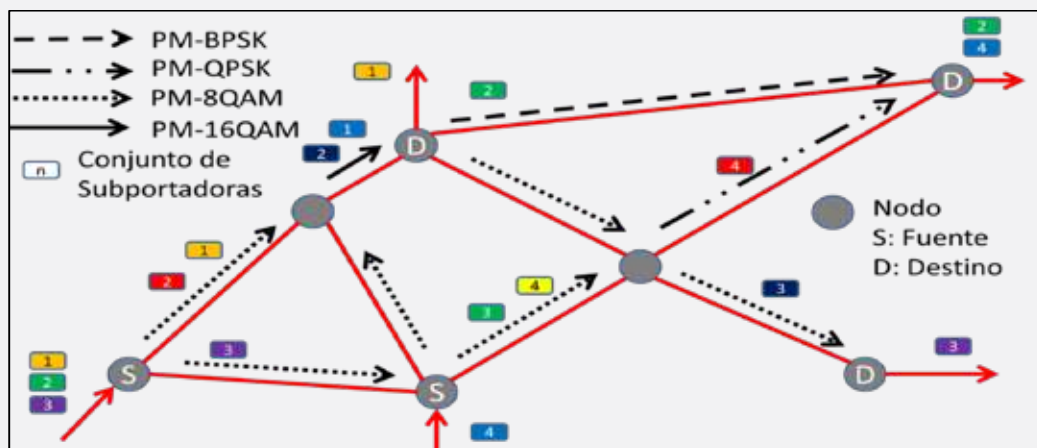


Figura 4. Red óptica elástica  
Fuente: [32]



Por otra parte, para apoyar la prestación eficiente de los servicios de paquetes y circuitos simultáneamente en las futuras redes ópticas, el software tendrá un papel mucho más importante, no sólo en el aspecto de control sino de la capa física de la red [12], [5], [6]. Algoritmos de asignación de recursos y de enrutamiento adaptativo desarrollados para redes *flexi-grid* y *fixed-grid* son utilizados para minimizar el uso del espectro y el número de *transponders* [23], [7], [8]; se ha demostrado que una red óptica mini-grid con pequeña rejilla de granularidad (ej. 3 GHz) puede alcanzar rendimiento similar a una red sin rejilla (*gridless*) ideal [20].

### 2.6 Habilitación de la multiplexación por división espacial

Otra técnica que ha surgido para el desarrollo de sistemas de alta capacidad, son los basados en multiplexación por división espacial (SDM, *Spatial Division Multiplexing*), siendo un candidato importante para las transmisiones futuras de largo alcance en el rango de terabits [33]. Esta *técnica que permite separar espacialmente los canales para transmitir* múltiples señales, a través de una sola fibra usando múltiples modos en fibras multimodo o a través de fibras de *múltiples núcleos*. Igualmente hace uso del procesamiento de señales de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*) en combinación con detección coherente [34]. Estos sistemas tienen una alta capacidad de transmisión, varias veces superiores a las obtenidas con los sistemas de fibra monomodo convencionales, el reto es poder extender el uso de SDM en las futuras redes elásticas. El uso de codificación espacio-temporal aplicado a la transmisión puede explotar la capacidad de los sistemas de transmisión multiportadora, y promover una mayor flexibilidad del sistema óptico.

### 3. Limitaciones y compensaciones de la fibra óptica en escenario de Redes Elásticas

Los operadores de telecomunicaciones buscan migrar a una nueva generación de redes, seleccionando una solución prometedora, en relación con su rendimiento, escalabilidad y a la inversión de capital requerida [22]. Se desea una arquitectura de red óptica elástica con flexibilidad en las tasas de transmisión donde se optimice la eficiencia espectral, con bajo consumo de potencia y bajo costo [21]. En este sentido, las investigaciones recientes en sistemas multiportadora conducen a la pertinencia en la identificación y compensación de los efectos lineales y no lineales que limitan el desarrollo de esta tecnología para transmisión de largas distancias y velocidades de transmisión superiores a los 400 Gbps.

En la fibra óptica, el índice de refracción incrementa con la intensidad del campo transmitido de acuerdo con la relación  $n = n_0 + n_2 I$ , donde  $n_0$  es la parte lineal del índice de refracción,  $I$  la intensidad y  $n_2$  es el coeficiente del índice no lineal. El valor numérico del coeficiente no lineal es típicamente  $n_2 = 2.35 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  para fibras de silicio y varía un poco con materiales dopantes usados dentro del núcleo. A pesar de su valor relativamente pequeño, el índice no lineal afecta significativamente la transmisión en los modernos sistemas de comunicaciones ópticas debido al incremento de potencia requeridos por las grandes longitudes de fibras y las altas tasas de transmisión. En particular, esto se debe a los fenómenos de SPM y XPM [35], [36].

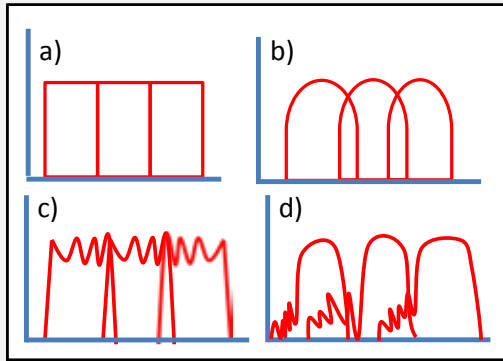


Figura 5. Esquema de espectros ópticos de canales en sistemas WDM: a) Canales ideales b) Canales Nyquist-WDM, c) afectados por SPM, d) afectados por XPM.

Fuente: Autores

SPM y XPM producen una alteración en la fase del pulso a través del efecto *Kerr*, el cual conlleva a un cambio en su espectro (ver figura 5). SPM determina un ensanchamiento del pulso en el espectro debido a cambios en su propia intensidad. En combinación con la dispersión del material, el ensanchamiento espectral puede conducir a una alteración en el ancho temporal del pulso. El ancho del pulso se puede expandir o comprimir dependiendo del signo de la dispersión por velocidad de grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*) [36]. Por su parte, XPM genera cambios en la fase de un pulso debido a la intensidad de pulsos en otras longitudes de onda, transmitidos en el mismo instante de tiempo; esto es realmente importante en el caso de sistemas WDM, donde los pulsos que viajan en diferentes longitudes de onda se propagan simultáneamente dentro de la misma fibra.

Desde que los pulsos pertenecientes a diferentes canales viajen a diferentes velocidades, ellos se superponen en algunos instantes de tiempo y mutuamente influyen en los demás. La fase de cada pulso en un canal dado se ve afectada por la potencia promedio y el patrón de bits de todos los canales, el cual es completamente aleatorio. Este hecho hace que la cancelación completa del XPM sea imposible en la práctica [35].

Otro tipo de efecto *Kerr* óptico es el FWM, un fenómeno no lineal en el cual interactúan canales a cierta longitud de onda con casamiento de fase, lo cual se consigue en fibras con dispersión cromática nula, y producen una o varias longitudes de onda extras en la señal. En general, el nombre hace referencia a la generación de una cuarta onda a partir del envío de 3 señales con longitudes de onda diferentes. Algunas ondas producidas por la mezcla interfieren con las señales de canales, por consiguiente causan daño espectral además de aumentar la tasa de error de bit. Los efectos del FWM aumentan cuando se reduce el espaciado de canales en sistemas WDM produciendo la ICI. Si bien la alta dispersión cromática disminuye el FWM debido a que se pierde coherencia en la señal, esta dispersión es un efecto lineal de la fibra óptica que produce la interferencia intersímbolo debido al ensanchamiento de los pulsos, ya que existe una dependencia del índice de refracción de la fibra con la longitud de onda, alterando la velocidad de propagación en las diferentes componentes espectrales del pulso [37]. Esta dispersión ha sido ampliamente estudiada y compensada para diferentes sistemas ópticos mediante fibras compensadoras de dispersión y ecualización adaptativa. Por otro lado, el núcleo de las fibras ópticas no es circularmente simétrico, por lo tanto las polarizaciones de la señal viajan con diferente velocidad de grupo a través de la fibra. Este fenómeno se conoce como dispersión por modo de polarización (PMD, *polarization-mode-dispersion*) siendo una limitante importante en transmisiones superiores a los 10 Gbps por canal [38].

### 3.1 Técnicas de procesamiento de señales para mitigar efectos distorsionadores del canal de fibra

Las imperfecciones de la fibra y la demanda de tráfico han liderado el desarrollo y optimización de sistemas ópticos con mayor capacidad y alta eficiencia espectral,

resultando en el surgimiento y rápido desarrollo de los sistemas ópticos coherentes. Los sistemas con detección coherente ganan interés por la habilidad de tener componentes de alta velocidad y de bajo costo, permitiendo la exploración de todos los parámetros del campo óptico (intensidad, frecuencia, fase, polarización) en el dominio eléctrico [39]. Desde la introducción a las comunicaciones ópticas de los receptores digitales coherentes, se han mostrado los enormes beneficios que el procesamiento digital de señales (DSP) le brinda a los sistemas *ópticos* para la optimización de las transmisiones de datos [40]-[42], lo cual facilita la migración a escenarios de elasticidad de las redes. Son diversas las aplicaciones del DSP en el desarrollo de los sistemas avanzados de comunicaciones ópticas, como se describe a continuación. Se distinguen principalmente dos campos de actuación: En la mitigación de efectos de canal y en los esquemas de modulación más complejos.

### 3.2 DSP aplicado a mitigación de efectos de canal

La implementación de técnicas que compensan electrónicamente las imperfecciones del enlace de fibra, y junto con estas técnicas, el desarrollo de nuevos esquemas robustos de modulación, las imperfecciones lineales invariantes en el tiempo como la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización pueden ser compensadas con la mínima penalidad usando un ecualizador lineal implementado en estos receptores, resolviendo parcialmente los problemas de las imperfecciones intracanal como la interferencia intersímbolo. Además, la flexibilidad de los módulos DSP también permite la aplicación del Aprendizaje de Máquina (*Machine Learning*) para resolver tareas que requieran mayor grado de inteligencia como la cognición y la adaptabilidad automática. Sin embargo, la integración de tareas inteligentes, tales

como reconocimiento, toma de decisiones, predicción y monitoreo dentro de la red, aún no han sido desarrolladas [43], [44].

Por otro lado, en sistemas multicanal, se han usado métodos convencionales para compensar la ICI usando filtrado óptico y eléctrico para suprimir el *crosstalk* [45], y ecualización basada en secuencias de entrenamiento [46]. En [47] compensan los efectos no lineales en una transmisión WDM, mediante el algoritmo de *backpropagation* con detección coherente. Ecualización con técnicas de estimación de máxima verosimilitud (MLSE, *Maximum Likelihood Sequence Estimation*) para compensación de la dispersión cromática y eliminación del ruido, también ha sido probada con éxito para la minimización de los efectos no lineales en WDM convencional [48] y técnicas de bloque de fase para compensar el FWM en WDM denso [49].

En [50] plantean una arquitectura de receptor para sistemas Nyquist-WDM, que conjuntamente detecta y demodula *múltiples canales* simultáneamente y mitiga las penalidades asociadas con las limitaciones de sistemas tipo Nyquist. Este receptor cuenta con 2 algoritmos DSP que fueron desarrollados para eliminar la ICI y recuperar la fase de la portadora. La ecualización multicanal es una técnica flexible y robusta que podría ser una candidata fuerte a ser implementada en transmisiones de supercanales [51].

En [52] proponen 4 métodos de control de la dispersión para eliminar el jitter de la fase producido por el efecto *kerr* y los evalúan en una red WDM modulada en DPSK, logrando un mejor factor de calidad usando compensación simétrica y compensación intermedia para pre-compensación y post-compensación. En [44] y [53] proponen un esquema de ecualización que usa estimación de máxima probabilidad *a posteriori* (MAP) para la mitigación de los efectos lineales

y no lineales de la fibra, usando un sistema con detección coherente, el primero con modulación DP-NRZ-QPSK y el otro usó esquemas multinivel de modulación con codificación no binaria.

### 3.3 DSP aplicado a esquemas de modulación avanzados

Los esquemas de modulación con codificación no binarios podría ser una técnica prometedora para permitir optimizar el espectro de los canales, enviando la mayor cantidad de símbolos sin depender de que sea una potencia  $2^n$ , distribuidos de tal manera que la información pueda ser recuperada. Estas técnicas de modulación han sido estudiadas en sistemas inalámbricos, usando codificación *wavelet* ortogonal [54], PSK modificado mediante *wavelets* [55], constelaciones *wavelets* obtenidas mediante algoritmos genéticos [56], y en los últimos años se ha extendido al campo óptico, con técnicas como modulación codificada de Trellis, modulación codificada de bit intercalada, constelaciones codificadas 4D [57], codificación de chequeo de paridad de baja densidad [57], [58], codificación *zig-zag* concatenada [38], entre otros, con la finalidad de optimizar los sistemas ópticos llevándolos a tener mayor capacidad, técnicas que en conjunto con DSP en detección coherente prometen optimizar y escalar las redes ópticas actuales, para alcanzar tasas superiores a los 100 Gbps logrando mitigar la ICI y la ISI en transmisiones multicanal.

De esta manera, las redes ópticas de nueva generación apuntan a ser heterogéneas, donde se optimice la eficiencia espectral con flexibilidad en las tasas de transmisión, permitiendo la elasticidad de la red ajustándose a las demandas de los usuarios [19]-[23]. Las redes de próxima generación deberán ser concebidas como sistemas inteligentes capaces de detectar las condiciones y fallos de la red, permitiendo un autoajuste con respecto

a las variaciones dinámicas de la red y las demandas impredecibles de los diferentes servicios de banda ancha [39], [40]. Es allí donde los algoritmos DSP con detección coherente jugarán un papel fundamental para el desarrollo de redes de alta capacidad junto con diferentes tipos de codificación, logrando tasas superiores a los 200 Gbps por canal mitigando las imperfecciones de la fibra óptica.

### 4. Conclusiones

En este artículo se abordaron temas claves para el desarrollo de las redes futuras de telecomunicaciones. En primera instancia se trata el nuevo concepto de elasticidad en redes ópticas, el cual abrirá caminos en el desarrollo de las próximas redes, pensando en soluciones adaptativas ante el incremento de la demanda de tráfico que mantiene su tendencia de crecimiento. La introducción del concepto de rejillas flexibles y redes ópticas elásticas posibilita una mejor utilización del espectro comparado con el estándar actual de rejillas de 50 GHz. Esto puede entenderse desde los siguientes puntos: i) se transmite mayor información usando los mismos recursos de infraestructura de la red previa a la actualización de la tecnología propuesta. ii) consumo eficiente de energía, al maximizar el uso del ancho de banda de los amplificadores ópticos. Esto conlleva a un menor costo de recursos de la red por cada bit transmitido. Una vez la rejilla de espectro fijo llegue a su punto máximo de explotación en términos de ancho de banda, muchas tecnologías de las que se abordan en este artículo cruzarán la barrera de las investigación al desarrollo de producto permitiendo las redes elásticas. Este proceso comienza con el desarrollo de los ROADMs flexibles, los cuales no llevarán un costo extra significativo en términos de costo-beneficio y habilitarán las redes ópticas elásticas. Sin embargo, estas redes elásticas requieren el tratamiento de efectos distorsivos como la interferencia intercanal para los próximos



estándares de 400 Gbps y superiores, los cuales, son foco de investigación actualmente, especialmente abordadas con técnicas de DSP y codificación, para permitir la optimización de la eficiencia espectral. Las investigaciones en esta temática y su desarrollo futuro, permiten avizorar la actualización de las redes actuales a redes elásticas, migrando desde las transmisiones de 40-G actualmente implementadas en Colombia y 100-G en otros países, a transmisiones de hasta 10 veces la capacidad de los estándares actuales. Esto permitirá el desarrollo de nuevos servicios de telecomunicaciones futuros que beneficien a la sociedad, en términos educativos y económicos, incluso en países en vía de desarrollo como Colombia.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo es soportado por la beca doctoral 567 de Colciencias y el proyecto CODI Sostenibilidad 2014-2015 de la Universidad de Antioquia.

## 6. Referencias

- [1] J-X. Cai, C.R. Davidson, A. Lucero, et al., "20 Tbit/s Transmission Over 6860 km With Sub-Nyquist Channel Spacing," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 4, pp. 651-657, 2012.
- [2] N. Cvijetic, M. Cvijetic, M-F. Huang, et al., "Terabit Optical Access Networks Based on WDM-OFDMA-PON," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 4, pp. 493-503, 2012.
- [3] W. Wei, C. Wang, J. Yu, "Cognitive optical networks: key drivers, enabling techniques, and adaptive bandwidth services," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, no. 1, pp. 106-113, 2012.
- [4] E. Torrenço, R. Cigliutti, G. Bosco, et al., "Transoceanic PM-QPSK Terabit superchannel transmission experiments at Baud-rate subcarrier spacing," en *Optical Communication (ECOC), 36th European Conference and Exhibition on*, 19-23 Sept. 2010, pp.1-3.
- [5] R. Cigliutti, A. Nespola, D. Zeolla, et al., "Ultra-long-haul transmission of 16x112 Gb/s spectrally-engineered DAC-generated Nyquist-WDM PM-16QAM channels with 1.05x(symbol-rate) frequency spacing," en *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 4-8 Mar. 2012, pp.1-3.
- [6] I. Tomkos, E. Palkopoulou, M. Angelou, "A survey of recent developments on flexible/elastic optical networking," en *Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference on*, 2-5 July 2012, pp.1-6.
- [7] F. Cugini, G. Meloni, F. Paolucci, et al., "Demonstration of Flexible Optical Network Based on Path Computation Element," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 5, pp. 727-733, Mar. 1, 2012.
- [8] A. Rosa, C. Cavdar, S. Carvalho, et al., "Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks," en *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2012 9th International Conference on*, 12-14 Dec. 2012, pp. 242-246.
- [9] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S.J.B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, no. 2, pp.s12-s20, Feb.2012.
- [10] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture,



- benefits, and enabling technologies,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 11, pp. 66-73, 2009.
- [11] Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid, Recommendation G.694.1, International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector (ITU-T), Feb. 2012.
- [12] J.D. Reis, M. Garrich, D.M. Pataca, J.C.M. Diniz, et al. “Flexible optical transmission systems for future networking,” en *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*, 2014 16th International, 17-19 Sept. 2014, pp.1-6.
- [13] G. Bosco, A. Carena, V. Curri, et al., “Performance Limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in High-Speed PM-QPSK Systems,” *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 22, no. 15, pp. 1129-1131, Aug. 1, 2010.
- [14] Z. Dong, X. Li, J. Yu, N. Chi, “6 x144-Gb/s Nyquist-WDM PDM-64QAM Generation and Transmission on a 12-GHz WDM Grid Equipped With Nyquist-Band Pre-Equalization,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 23, pp. 3687-3692, Dec.1, 2012.
- [15] M. Wu, W. Way, “Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 22, no. 6, pp.1483,1498, June 2004.
- [16] Y. Chen, J. Li, C. Zhao, et al., “Experimental Demonstration of ROADM Functionality on an Optical SCFDM Superchannel,” *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 24, no. 3, pp. 215-217, Feb.1, 2012.
- [17] R. Dischler, F. Buchali, A. Klekamp, “Demonstration of bit rate variable ROADM functionality on an optical OFDM superchannel,” En *Optical Fiber Communication (OFC)*, collocated National Fiber Optic Engineers Conference, Conference on (OFC/NFOEC), 21-25 March 2010, p.1,3.
- [18] R. Noe, M.F. Panhwar, C. Wordehoff, D. Sandel, “Realtime digital signal processing in coherent optical PDM-QPSK and PDM-16-QAM transmission,” En *Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Proceedings of the 22nd European, 1-5 Sept. 2014, pp.1885-1889.
- [19] P. P. Biswas, A. Singh, D.Chadha, “Energy efficient design for Green optical core network,” en *Communications (NCC)*, National Conference on, 15-17 Feb. 2013, pp.1-5.
- [20] G. Shen; Q. Yang, “From coarse grid to mini-grid to gridless: How much can gridless help contentionless?,” en *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, and the National Fiber Optic Engineers Conference, 6-10 March 2011, pp.1-3.
- [21] S. Zhang; B. Mukherjee, “Energy-efficient dynamic provisioning for spectrum elastic optical networks,” in *Communications (ICC)*, 2012 IEEE International Conference on, 10-15 June 2012, p. 3031,3035.
- [22] M. Angelou, K. Christodoulopoulos, D. Klonidis, et al., “Spectrum, cost and energy efficiency in fixed-grid and flex-grid networks,” en *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, and the National Fiber Optic Engineers Conference, 4-8 March 2012, pp. 1, 3.
- [23] L. Shi, S-S. Lee; H. Song; B. Mukherjee, “Energy-Efficient Long-Reach Passive

- Optical Network: A Network Planning Approach Based on User Behaviors,” *Systems Journal, IEEE*, vol. 4, no. 4, pp. 449-457, Dec. 2010.
- [24] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea, B. Mukherjee, “A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking,” *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 65-87, First Quarter 2013.
- [25] Z. Jia; J. Yu; H.-C. Chien, et al., “Field Transmission of 100 G and Beyond: Multiple Baud Rates and Mixed Line Rates Using Nyquist-WDM Technology,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 24, pp. 3793-3804, Dec.15, 2012.
- [26] H-C. Chien, J. Yu, Z. Jia, et al., “Performance Assessment of Noise-Suppressed Nyquist-WDM for Terabit Superchannel Transmission,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 24, pp. 3965-3971, Dec.15, 2012.
- [27] T. Rahman, D. Rafique, A. Napoli, et al., “Ultralong Haul 1.28-Tb/s PM-16QAM WDM Transmission Employing Hybrid Amplification,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 33, no. 9, pp. 1794-1804, May.1, 2015.
- [28] Y. Wang, X. Cao, Y. Pan, “A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced Elastic Optical Path networks,” in INFOCOM, Proceedings IEEE, 10-15 April 2011, pp.1503-1511.
- [29] M. Klinkowski, K. Walkowiak, “Routing and Spectrum Assignment in Spectrum Sliced Elastic Optical Path Network,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 15, no. 8, pp. 884-886, August 2011.
- [30] X. Wan, L. Wang, N. Hua, et al., “Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks,” En Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), and the National Fiber Optic Engineers Conference, 6-10 March 2011, pp. 1-3.
- [31] A.F.B. Perez, I.K. Velez, A.M. Cardenas, N. Guerrero, “Broadband optical wavelenght conversion for next generation optical superchannels,” en Communications and Computing (COLCOM), 2013 IEEE Colombian Conference on , 22-24 May 2013, pp.1-5.
- [32] A. F. Betancur-Pérez; J. J. Granada-Torres; N. Guerrero-González, “Redes elásticas del futuro: beneficios para la red interna de telecomunicaciones de Colombia”, *Revista Tecno Lógicas*, vol. 18, no. 34, pp. 125-136, 2015.
- [33] M. D. Feuer, L.E. Nelson, X. Zhou, et al., “Joint Digital Signal Processing Receivers for Spatial Superchannels,” *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 24, no. 21, pp. 1957-1960, Nov.1, 2012.
- [34] R. Ryf, S. Randel, A.H. Gnauck, et al., “Mode-Division Multiplexing Over 96 km of Few-Mode Fiber Using Coherent 6  $\times$  6 MIMO Processing,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 4, pp. 521-531, Feb.15, 2012.
- [35] M.S. Ferrerira. Nonlinear effects in optical fibers. A John Wiley & Sons, INC. 2011.
- [36] Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, 3 Ed. Optics and Photonics, 2001.
- [37] J.J.G. Torres, G.M.V.Duran, N.G. Gonzalez, “Chromatic dispersion effects in a radio over fiber system with PSK modulation and coherent detection,”

- En Communications Conference (COLCOM), IEEE Colombian, 16-18 May 2012, pp.1-6.
- [38] R. Ramaswami, K. Sivarajan; G. Sasaki, “Optical Networks: A practical perspective”, 3<sup>rd</sup> Edition, Elsevier Inc. 2010.
- [39] S. Kahveci, C. Gong; X.Wang, “Zigzag-coded modulation for high-speed fiber optical channels,” *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 4, no. 5, pp. 382-391, May 2012.
- [40] K. Sato, H. Hasegawa, “Optical Networking Technologies That Will Create Future Bandwidth-Abundant Networks [Invited],” *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 1, no. 2, pp. A81-A93, July 2009.
- [41] S.J. Savory, “Digital Coherent Optical Receivers: Algorithms and Subsystems,” *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 16, no. 5, pp.1164-1179, Sept.-Oct. 2010.
- [42] T.S.R. Shen, A.P.T. Lau, “Fiber nonlinearity compensation using extreme learning machine for DSP-based coherent communication systems,” En Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 16th, 4-8 July 2011, pp. 816-817.
- [43] X. Liu, S. Chandrasekhar, P.J. Winzer, “Digital Signal Processing Techniques Enabling Multi-Tb/s Superchannel Transmission: An overview of recent advances in DSP-enabled superchannels,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 31, no. 2, pp. 16-24, March 2014.
- [44] A.P.T. Lau, G. Yuliang; Q. Sui, et al., “Advanced DSP Techniques Enabling High Spectral Efficiency and Flexible Transmissions: Toward elastic optical networks,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 31, no. 2, pp. 82-92, March 2014.
- [45] J. Pan, C. Liu; T. Detwiler, et al., “Inter-Channel Crosstalk Cancellation for Nyquist-WDM Superchannel Applications,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, no. 24, pp. 3993-3999, Dec.15, 2012.
- [46] J.J. Granada, A.M. Cardenas, N. Guerrero, “Evaluation and compensation of interchannel interference effects in a 16-QAM Nyquist-WDM system with LMS equalization,” en Communications (LATINCOM), 2014 IEEE Latin-America Conference on, 5-7 Nov. 2014, pp.1-6.
- [47] E. Ip, “Nonlinear Compensation Using Backpropagation for Polarization-Multiplexed Transmission,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 28, no. 6, pp. 939-951, March 15, 2010.
- [48] H.S. Carrer, D.E. Crivelli, M.R. Hueda, “Maximum likelihood sequence estimation receivers for DWDM lightwave systems,” in Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '04. IEEE, vol.2, 29 Nov.-3 Dec. 2004, pp.1005,1010.
- [49] E. Yamazaki, F. Inuzuka, K. Yonenaga, et al., “Nonlinearity compensation in WDM transmission,” IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, 2008 Digest of the, 21-23 July 2008, pp.165-166.
- [50] C. Liu; J. Pan; T. Detwiler, et al., “Joint digital signal processing for superchannel coherent optical systems: Joint CD compensation for joint ICI cancellation,” En Optical Communications (ECOC), 38th European Conference and Exhibition on, 16-20 Sept. 2012, pp.1-3.

- [51] T. Zeng, "Superchannel transmission system based on multi-channel equalization," *Journal of Opics. Express*, vol. 21, no. 12, pp.14799-14807, 2013.
- [52] M. Xu, Z. Ying, Y. Luo; J. Ji, "The study of DPSK dispersion management on kerr nonlinear suppression," in Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), Asia, 2-6 Nov. 2009, pp.1-7.
- [53] I.B. Djordjevic, L.L. Minkov, L. Xu; T. Wang, "Suppression of Fiber Nonlinearities and PMD in Coded-Modulation Schemes With Coherent Detection by Using Turbo Equalization," *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 1, no. 6, pp. 555-564, November 2009.
- [54] E.-J.Yi, E.J. Powers, "Wavelet-based orthogonal modulation code," En Signals, Systems, and Computers, 1999. Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on, vol.2, pp.1632-1636, 24-27 Oct. 1999.
- [55] E.A. Santos, E.C. Gurjao; F.M. de Assis, "Projeto de Constelacoes de Sinais para Codificacao», En XXIX Simposio Brasileiro de Telecomunicacoes - SBrT'11, Oct. 2011, pp. 02-05.
- [56] H. Bulow, E. Masalkina, "Coded modulation in optical communications," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, 6-10 March 2011, pp.1,3.
- [57] M. Arabaci, I.B. Djordjevic, R. Saunders, R.M. Marcoccia, "Non-binary quasi-cyclic LDPC-coded modulation for beyond 100 Gb/s optical transmission," En LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, LEOS '09. IEEE, 4-8 Oct. 2009, pp. 428-429.
- [58] M. Arabaci, I.B. Djordjevic, L. Xu, T. Wang, "Nonbinary LDPC-Coded Modulation for High-Speed Optical Fiber Communication Without Bandwidth Expansion," *Photonics Journal, IEEE*, vol. 4, no. 3, pp.728-734, June 2012.