

## **Eficiencia espectral de formatos de modulación avanzados en redes XGS-PON**

### **Spectral efficiency of advanced modulation formats in XGS-PON networks**

**Gustavo Adolfo Gómez-Agredo<sup>1</sup>, José Giovanni López-Perafán<sup>2</sup>**

Cite this article as: G. A. Gómez-Agredo and J. G. López-Perafán, "Spectral efficiency of advanced modulation formats in XGS-PON networks", *Visión Electrónica*, vol. 2, no. 1, Special edition, January-June 2019.

**Resumen:** Debido al rápido crecimiento y desarrollo de servicios y aplicaciones, desde la introducción de los sistemas ópticos basados en DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), la demanda de mayor ancho de banda y mayores velocidades de transmisión de datos por canal se ha hecho evidente. Hoy en día, los sistemas comerciales DWDM implementan pocas longitudes de onda con espaciamientos por canal de 100 GHz a velocidades de 2.5 Gbps generando una eficiencia espectral alrededor de 0.25 b/s/Hz utilizando formatos modulados en intensidad, sin embargo, las arquitecturas de red modernas desplegadas en los núcleos del sistema, requieren alcanzar velocidades de transmisión de datos del orden de los 40 Gbps con una eficiencia espectral alrededor de los 0.8 b/s/Hz gracias

---

<sup>1</sup> Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia. Magister (C) en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia. Docente Investigador, Universidad del Cauca, Departamento de Telecomunicaciones, Miembro Grupo de Investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT, Universidad del Cauca, Colombia. Correo electrónico: [gtgomez@unicauca.edu.co](mailto:gtgomez@unicauca.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3413-562X>

<sup>2</sup> Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia. Especialización en docencia universitaria, Universidad Cooperativa de Colombia. Maestría en Telemática, Universidad del Cauca, Colombia. Doctorado en Ciencias de la Electrónica, Universidad del Cauca, Colombia. Docente Investigador, Universidad del Cauca, Departamento de Telecomunicaciones, Miembro Grupo de Investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT, Universidad del Cauca, Colombia. Correo Electrónico: [glopez@unicauca.edu.co](mailto:glopez@unicauca.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8576-3458>

a la implementación de soluciones costo-eficientes que actualizan las redes existentes, siendo los formatos de modulación avanzados y las arquitecturas propuestas por FSAN (*Full Service Access Network*) de tipo XGS-PON (*10 Gigabit Capable Passive Optical Networks*) mecanismos en la búsqueda de resolver dichos inconvenientes. En el desarrollo de este artículo, se diseñaron y simularon arquitecturas de próxima generación, utilizando formatos de modulación avanzados, enfocados en satisfacer los requerimientos de capacidad, ancho de banda y eficiencia espectral para el futuro de las comunicaciones ópticas.

**Palabras clave:** DWDM, XGS-PON, Formatos de Modulación Avanzados, Eficiencia Espectral, Teoría de la Información, FSAN.

**Abstract:** Due to the rapid growth and development of services and applications, since the first introduction of DWDM system (Dense Wavelength Division Multiplexing), the demand of higher bandwidth and higher data transmission rates per channel has become evident. Today, commercial DWDM systems implement few wavelengths with spacings per channel of 100 GHz and data rates around 2.5 Gbps, generating a spectral efficiency around 0.25 b / s / Hz using intensity modulated formats, however, network architectures modern deployed in the system's cores, need to reach data transmission rates of 40 Gbps with spectral efficiency around 0.8 b / s / Hz implementing cost-efficient solutions that update existing networks, being the advanced modulation formats and the architectures proposed by FSAN (*Full Service Access Network*) type XGS-PON (*10 Gigabit Capable Passive Optical Networks*) mechanisms in the search to solve these inconveniences. In the development of this article, next-generation architectures are designed and simulated, using advanced modulation formats, focused on satisfying the requirements of capacity, bandwidth and spectral efficiency of future optical communications.

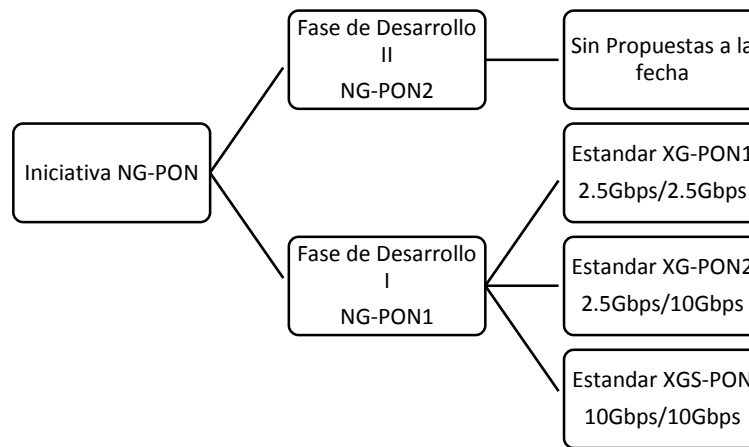
**Keywords:** DWDM, XGS-PON, Advanced Modulation Formats, Spectral Efficiency, Information Theory, FSAN.

## 1. Introducción

Las redes Ópticas Pasivas PON (*Passive Optical Networks*) han evolucionado en los últimos años a través de sus diferentes estándares definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU (*International Telecommunication Union*) en términos de dos grupos principales: el primero, basado en GPON (*Gigabit Passive Optical Networks*); y el segundo, basado en EPON (*Ethernet Passive Optical Networks*), como una solución de banda ancha que permite transparencia, seguridad y escalabilidad de servicios y aplicaciones para los requerimientos y necesidades del entorno actual de los sistemas de comunicaciones [1-4]. Las características y arquitectura de las redes basadas en EPON y GPON se definen en los estándares 802.3 [5] y G.984.1 [6] respectivamente, donde el grupo de tareas FSAN de la UIT y el comité europeo para la implementación de soluciones de Fibra (*Fibre to the Home Council Europe*), especifican diferentes arquitecturas de red con el objetivo común de generar sistemas de transporte de ultra alta capacidad y ancho de banda.

La Figura 1 presenta una propuesta de migración de los sistemas basados en fibra óptica, donde el requerimiento de la coexistencia de señales con diferentes velocidades de transmisión de datos se basa en generar una actualización simple a las arquitecturas existentes. NG-PON2 (*40 Gigabit Capable Passive Optical Networks*) definido por la recomendación G989.1 [7], se presenta como una solución óptima al deseo de obtener velocidades del orden de los 40 Gbps y 100 Gbps, sin embargo, se espera que dicha migración se logre a través de redes de tipo XG-PON [8] (*10 Gigabit Capable Passive Optical Networks*) operando a una velocidad de transmisión de datos de 2.5 Gbps en el enlace de subida y 10 Gbps en el enlace de bajada y XGS-PON (*10 Gigabit Capable Symmetric Passive Optical Network*) [9-10] el cual define una versión simétrica a 10 Gbps [11]. XGS-PON, se presenta como una fase de transición a la migración de redes de nueva generación de tipo NG-OAN's

(*Next Generation Optical Access Networks*) permitiendo; seguridad, escalabilidad y transparencia de servicios y aplicaciones de tipo comercial y residencial.



**Figura 1.** Migración de 2.5 Gbps a 40 Gbps para la iniciativa NG-PON

Fuente: elaboración propia

Se espera que para los siguientes años, los sistemas de fibra óptica mejoren en el manejo de tráfico, ancho de banda y capacidad, con el fin de alcanzar los estándares propuestos por FSAN con miras a implementar redes de tipo AON (*All Optical Network*); para tal fin, y como objetivo del presente artículo, se deben analizar soluciones que implementen formatos de modulación avanzados para lograr una mayor eficiencia espectral del sistema de telecomunicaciones [12].

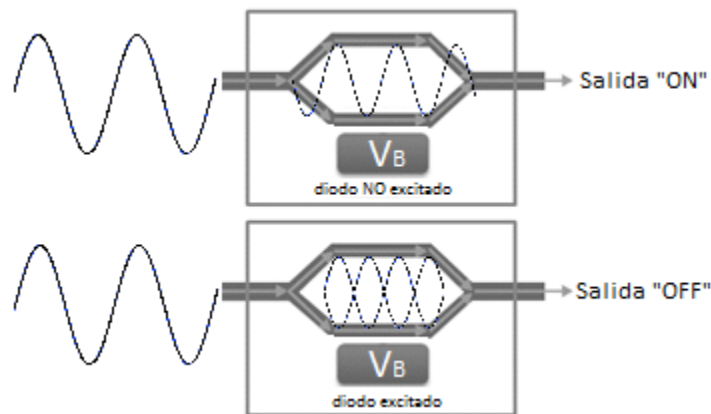
### 1.1. Formatos de modulación avanzados para arquitecturas XGS-PON

Las señales Ópticas, poseen tres propiedades que pueden ser implementadas para transportar información: la intensidad, la fase y la polarización. Mientras los formatos de modulación basados en intensidad han sido ampliamente utilizados en comunicaciones ópticas, el atributo de la fase y la polarización ha recibido muy poca atención, debido principalmente al incremento en la complejidad del transmisor y del receptor, haciendo difícil su detección; sin embargo, para el propósito del presente artículo, se desea hacer énfasis en las soluciones que se pueden proponer desde el punto de vista de los esquemas de modulación avanzados de fase

diferencial DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) que pueden ser generados haciendo uso de dispositivos Mach-Zehnder MZIM (*Mach Zehnder Interferometer*).

## 1.2. Moduladores externos de intensidad Mach-Zehnder (MZIM)

Este tipo de moduladores externos basa su operación en la generación de cambios en el índice de refracción de la guía de onda generando el estado “ON” el cual hace referencia al modo de interferencia constructivo y el estado “OFF” el cual hace referencia al modo de interferencia destructivo. La Figura 2 demuestra los procesos de tipo constructivo y destructivo de modo que, para generar el estado “ON” o salida en fase constructiva, ningún voltaje es aplicado al electrodo de excitación permitiendo combinar las dos señales de los diferentes trayectos en una salida simple, para el estado “OFF” o salida en fase destructiva, un voltaje es aplicado al electrodo de excitación generando un cambio en el índice de refracción de la guía de onda que produce un retardo de fase sobre uno de los trayectos; si la fase resultante es un múltiplo del factor  $\pi$ , las señales de los dos trayectos se encuentran completamente desfasadas y su combinación será completamente destructiva [13].

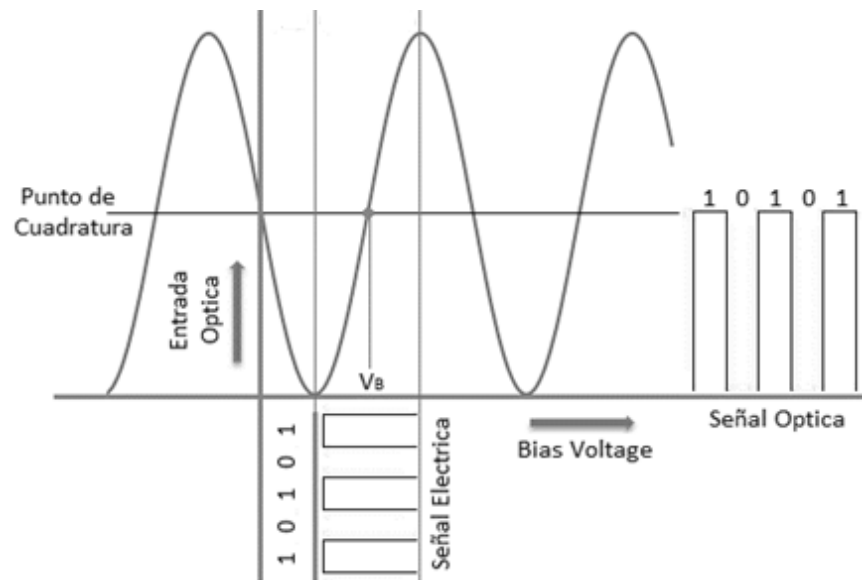


**Figura 2.** Principio de interferencia constructiva y destructiva de un modulador MZIM

Fuente: elaboración propia

La Figura 3 describe la curva característica del modulador Mach-Zehnder, donde el voltaje de excitación  $V_B$  en el electrodo induce los diferentes estados; dicho voltaje es conocido como voltaje de control (*Driving Voltage*) siendo un importante parámetro en su desempeño [14]. Si

el voltaje de entrada corresponde a una secuencia de pulsos, entonces la secuencia de pulsos ópticos de salida del modulador seguirá la forma de onda de la señal cuadrada.



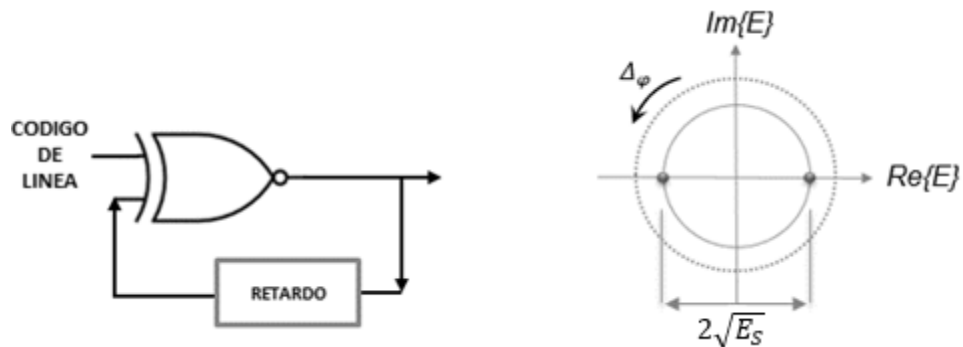
**Figura 3.** Curva Característica modulador Mach-Zehnder de intensidad (MZIM)

Fuente: elaboración propia

### 1.3. Formato de modulación DPSK - Differential Phase Shift Keying

La modulación basada en el manejo por desplazamiento de fase binaria diferencial D-BPSK (*Differential Binary phase shift keying*), también llamada desplazamiento de fase diferencial DPSK, es una técnica de modulación de tipo coherente, donde se requiere sincronización entre la señal de entrada y la señal portadora que se genera en el demodulador. Algunos inconvenientes se pueden generar en este tipo de detección debido al ensanchamiento de los pulsos ópticos (Dispersión Cromática) y problemas de Chirp, efecto que se produce debido a una variación de la frecuencia y amplitud de la señal emitida por el láser, produciendo un ensanchamiento indeseado del espectro, el cual dependiendo del tipo específico de láser y esquema de modulación utilizado puede afectar considerablemente el desempeño del sistema. Debido a que la modulación DPSK codifica la información en la fase de la señal y puede ser detectada de manera no coherente, solo se requiere coherencia de la portadora óptica sobre

un único periodo de bit para la comparación de la fase codificada diferencialmente de los pulsos ópticos consecutivos, de modo que, como se aprecia en la Figura 4, de forma similar a una operación de tipo XOR, los “1’s” digitales son generados si se presenta un cambio en la fase de  $\pi$  entre los bits de datos consecutivos de la portadora óptica, mientras que los “0’s” digitales serán codificados si no se presenta dicho cambio de fase [15-17].



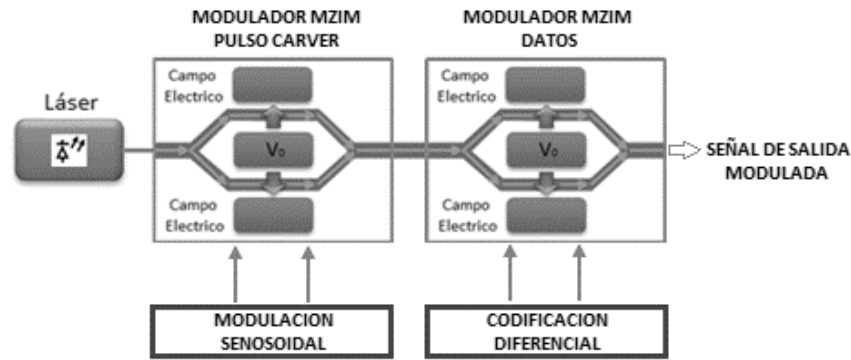
**Figura 4.** Codificación Binaria y Diagrama de Símbolos DPSK

Fuente: elaboración propia

El diagrama de símbolos de la modulación DPSK, definido en la Figura 4, sugiere que los dos puntos de constelación poseen la misma energía promedio de símbolo ( $E_s$ ), donde cada símbolo representa una de dos posibles fases, a saber, 0 y  $\pi$ . Dado que la distancia entre los dos símbolos de la constelación es:  $2\sqrt{E_s}$ , así la potencia promedio será la misma que para los esquemas modulados en intensidad; donde el incremento en la distancia entre los símbolos mejora la tolerancia de la relación señal a ruido en un factor de 3dB [17].

En la figura 5, se aprecia la configuración de un modulador de fase diferencial basado en estructuras Mach-Zehnder donde la principal ventaja de implementar este esquema de modulación diferencial es el incremento en la distancia entre símbolos la cual permite una reducción de aproximadamente 3dB en el requerimiento de la relación señal a ruido óptica *OSNR* (*Optical Signal Noise Ratio*) donde, dependiendo de los parámetros de configuración del sistema, es posible exceder la ganancia del esquema DPSK en 3dB y ofrecer una eficiencia

espectral teórica superior o igual a 0.8 bits/s/Hz. Del mismo modo, el comportamiento de este esquema de modulación para velocidades de transmisión de datos iguales o superiores a los 10 Gbps mejora significativamente su respuesta frente a las degradaciones de tipo lineal y no lineal presentes en la transmisión óptica [18].



**Figura 5.** Diagrama de Bloques de un Transmisor típico basado en DPSK

Fuente: elaboración propia

## 2. Eficiencia Espectral

Los fundamentos de la Teoría de la Información, desarrollados por C. E. Shannon en su artículo “*A Mathematical Theory of Communication*” [19] presentado en 1948 en “*The Bell System Technical Journal*”, define la relación existente entre el ancho de banda de un canal, la potencia promedio transmitida ( $P$ ) y la potencia de ruido ( $N_0B$ ). La ecuación 1, corresponde a la capacidad del canal Gaussiano para señales de tipo real expresada en bit por uso del canal, donde ( $P$ ) representa la potencia de transmisión, ( $B$ ) el ancho de banda del canal y ( $N_0$ ) la densidad espectral de potencia de ruido [20-22]:

$$C_{\left[\frac{\text{bit}}{\text{uso de canal}}\right]} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad (1)$$

A partir de la ecuación 1, es posible relacionar la capacidad de un canal de comunicación Gaussiano ( $C$ ) con el ancho de banda y la máxima transmisión de datos del sistema ( $R_b$ ):

$$R_b \text{ [bps]} \leq C_{\text{[bps]}} = \frac{1}{2T} \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad (2)$$



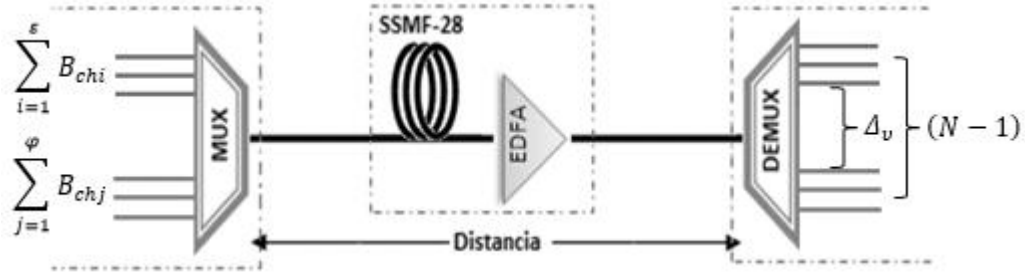
El término  $\frac{1}{2T}$  corresponde al ancho de banda Nyquist, es decir, el mínimo ancho de banda necesario para transmitir a una velocidad de  $\frac{1}{T}$  símbolos por segundo sin generar interferencia intersímbolo ISI (*Intersymbol Interference*), por tanto; se puede expresar la ecuación 2 en términos de:

$$C_{[bit/s]} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad (3)$$

La ecuación 3, define “*el limite fundamental de la tasa de transmisión que se puede conseguir sobre un canal con ruido limitado en banda y una señal limitada en potencia, para una probabilidad de error arbitrariamente baja*”. Según estudios realizados en [23-27], la medida de la eficiencia espectral para un sistema de comunicaciones optico, depende de factores tales como la técnica de modulación, la técnica de detección, el régimen de propagación, el ancho de banda del canal, la relación señal a ruido limitada por las restricciones de potencia; Cuando la velocidad de transmisión se acerca a la capacidad, la complejidad del sistema aumenta considerablemente. De manera general se puede expresar la máxima eficiencia espectral  $\eta$ , en términos de la capacidad del canal y el ancho de banda total ocupado como:

$$\eta_{\left[\frac{bps}{Hz}\right]} = \frac{C_{[bps]}}{B_{[Hz]}} \quad (4)$$

Como se muestra en la Figura 6, si se implementan múltiples canales de tipo  $\varepsilon$  y de tipo  $\varphi$ , la eficiencia máxima total estará en términos de la capacidad del sistema y el espaciamiento de los canales adyacentes, representado como una combinación de 2 parámetros en términos de  $(N - 1)\Delta_v$ , donde  $\Delta_v$  hace referencia al espaciamiento de las frecuencia centrales de los canales ópticos y  $(N - 1)$  al corrimiento de dichas frecuencias sobre la grilla espectral.



**Figura 6.** Asignación del espectro para un sistema DWDM de tipo XG/NG-PON

Fuente: elaboración propia

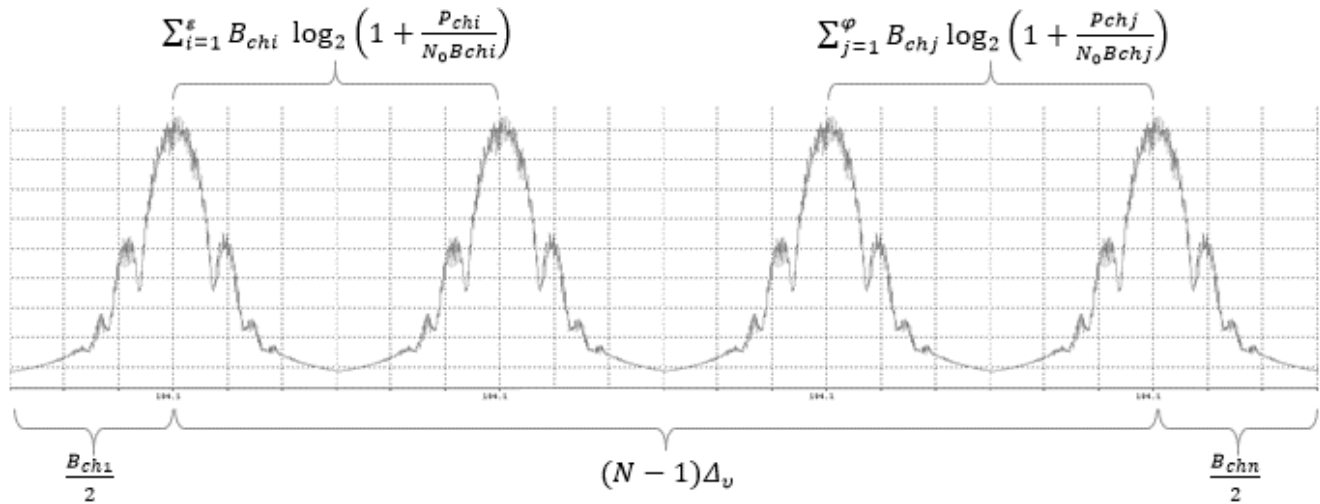
El proceso de adaptación de la teoría de la información consiste en establecer una medida equivalente de capacidad en términos del ancho de banda utilizado, de modo que, controlando el espaciamiento óptico ( $\Delta_v$ ) se puede disminuir hasta un límite máximo la distancia entre canales adyacentes sin producir interferencia intra-canal, de modo que, si se implementan múltiples canales para  $(N - 1)$  corrimientos, la eficiencia espectral  $\eta_{max}$  del sistema DWDM estará dada por; la capacidad del sistema dividida por el ancho de banda total ocupado el cual considera la mitad del ancho de banda del primer canal óptico de la grilla espectral (frecuencia relativa más baja  $B_{ch1}$ ) más la mitad del ancho de banda del ultimo canal óptico de la grilla espectral (frecuencia relativa más alta  $B_{chn}$ ) más el espaciamiento por canal y el número de canales propagados  $(N - 1)\Delta_v$  (N corrimientos de frecuencia a  $\Delta_v$  espaciamientos) siendo una medida equivalente representada por [28 - 29]:

$$\eta_{\max[\frac{bps}{Hz}]} = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{chi} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{chi}}{N_0 B_{chi}} \right) + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{chj}}{N_0 B_{chj}} \right)}{\frac{(B_{ch1} + B_{chn})}{2} + (N-1)\Delta_v} \quad (5)$$

Donde el término  $\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{chi} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{chi}}{N_0 B_{chi}} \right)$ , representa la capacidad de acceso de diferentes canales propagados de tipo  $\epsilon$  y el término  $\sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{chj}}{N_0 B_{chj}} \right)$  representa la capacidad de acceso de los diferentes canales propagados de tipo  $\varphi$  para una potencia de entrada ( $P$ ) y una potencia de ruido ( $N_0 B$ );  $\frac{B_{ch1}}{2}$  es la mitad del ancho de banda del primer canal de la grilla

espectral,  $\frac{B_{chn}}{2}$  es la mitad del ancho de banda del ultimo canal de la grilla espectral y  $(N - 1)\Delta_\nu$  representan los N corrimientos de frecuencia a  $\Delta_\nu$  espaciamentos.

Como se aprecia en la Figura 7, es posible relacionar todos los factores descritos en la ecuación 5, en términos del comportamiento espectral de cualquier cantidad de señales propagantes en un medio óptico, permitiendo de este modo manipular dichas variables para obtener una mejor eficiencia espectral.



**Figura 7.** Relaciones del comportamiento óptico en términos de la teoría de la información

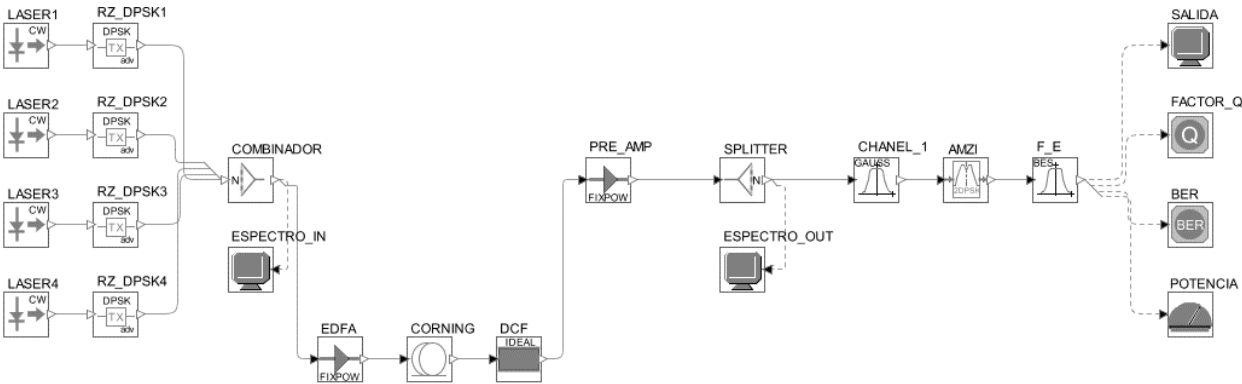
Fuente: elaboración propia

La Ecuación 5 “adaptación de la teoría de la información para el régimen de propagación lineal en arquitecturas de red DWDM de próxima generación” propuesta en el presente artículo, implica que es posible incrementar la eficiencia espectral en un sistema óptico XGS-PON controlando los parámetros de configuración de la arquitectura.

### 3. Diseño e Implementación de una arquitectura de red XGS-PON

El esquema general de un sistema óptico para una arquitectura de red de tipo XGS-PON se puede apreciar en la Figura 8, donde se implementa un total de 4 canales ópticos cada uno con una velocidad de transmisión de datos de 10 Gbps. Para este diseño, se debe garantizar un régimen de propagación predominantemente lineal, con el fin de no exceder las

restricciones de potencia, las cuales generaran fenómenos de Kerr. Del mismo modo, dado que la dispersión cromática es uno de los efectos predominantes y más complejos en la propagación lineal, se procede a compensar dicho fenómeno mediante módulos compensadores ideales “*Ideal Fiber Grating*”, suministrados por la herramienta RSoft OptSim™ de Synopsys.



**Figura 8.** Modelo de Simulación de tipo XGS-PON.

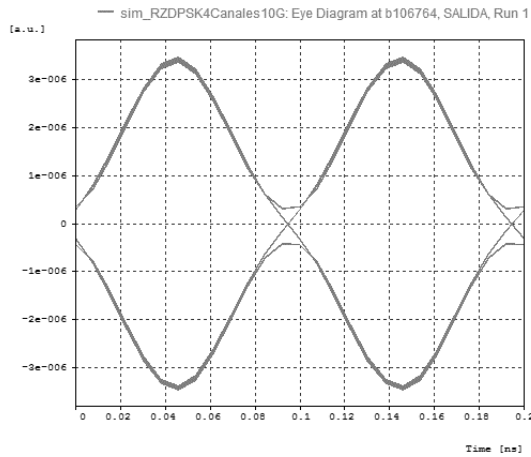
Fuente: elaboración propia

Los parámetros generales de configuración de la arquitectura de red se detallan en la tabla 1, donde se describen los elementos de configuración monitoreo y control, implementados. Del mismo modo, se puede apreciar el comportamiento inicial del sistema en las Figuras 9 (a) y 9 (b), obteniéndose una tasa de errores de bit BER=1e<sup>-40</sup>, el factor de calidad Q=40 dB, potencia en recepción alrededor de los -23.5dBm y una relación señal a ruido óptica OSNR de 29.4 dB.

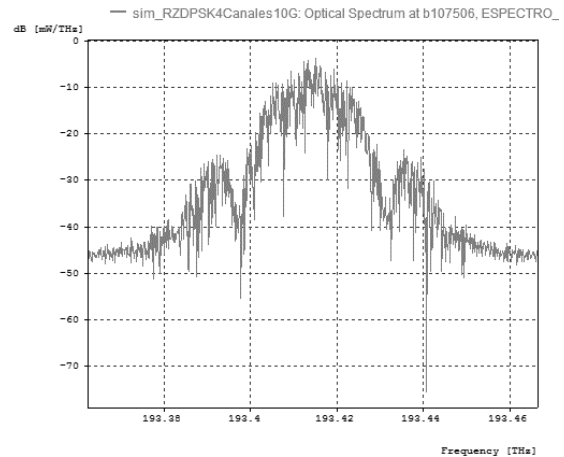
Parámetro	Valor
Velocidad de Acceso	10 Gbps
Longitud del enlace para fibra Corning	80 Km
Módulos Compensadores DCF	ideales
Ganacia dispositivos EDFA	5 dB a 30 dB
Potencia del Laser	0 dBm a 15 dBm
Módulos de monitoreo y control	Espectro In, Espectro Out, Salida, Factor Q, BER, Potencia

**Tabla 1.** Parámetros de Configuración Generales DPSK.

Fuente: elaboración propia



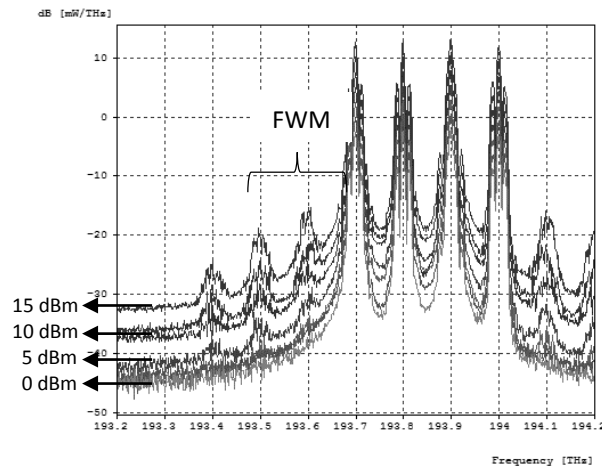
**Figura 9 (a)** Señal modulada y monitoreada en recepción



**Figura 9 (b)** Espectro Óptico a la salida del sistema

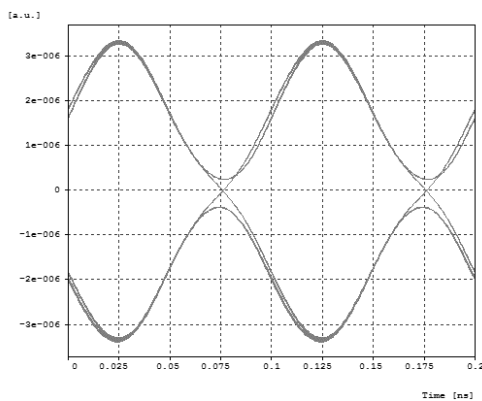
### 3.1. Control del régimen de propagación lineal en el sistema óptico

Para controlar el régimen de propagación del sistema óptico, es indispensable determinar los valores máximos de amplificación de los dispositivos, para no introducir fenómenos de Kerr (efectos de tipo no lineal) debido a las restricciones de potencia. En la Figura 10, se demuestra el comportamiento espectral de los canales ópticos propagados a la salida del sistema y monitoreados en recepción, donde, la potencia del láser es un factor determinante en la generación de los fenómenos de Kerr y una pequeña variación en su nivel aporta significativamente en un cambio de régimen de propagación. La línea inferior de la gráfica del espectro de los cuatro canales ópticos propagados, representa el comportamiento del sistema con una potencia del láser de 0 dBm, mientras la línea superior lo hace para una potencia de 15 dBm, donde es evidente el fenómeno de Kerr no lineal de mezcla de cuatro ondas FWM (*Four Wave Mixing*), el cual genera canales adicionales con niveles de potencia dentro de los umbrales detectables del sistema ocasionando interferencia entre portadoras ópticas y ocupado grilla espectral, lo que conlleva a errores de transmisión.

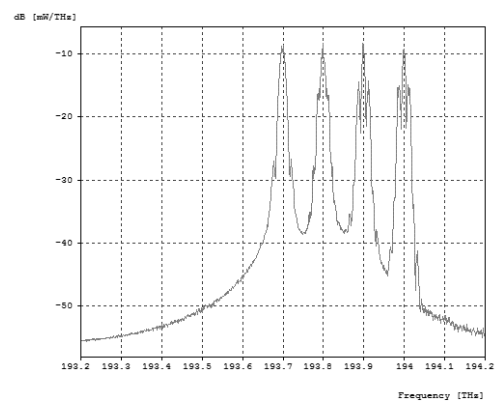


**Figura 10.** Espectro de salida para la variación de la potencia del canal óptico en un sistema DWDM.

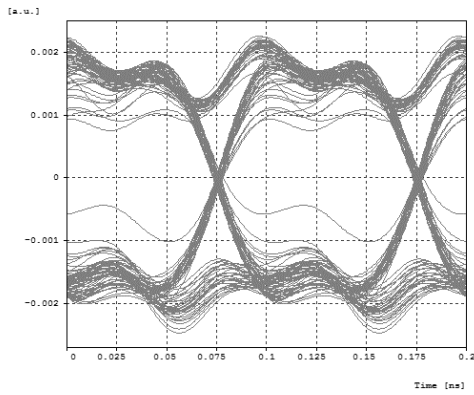
Como se puede apreciar en la Figuras 11 (a) a 11 (d), la configuración de la ganancia del EDFA no es un parámetro significativo en el desempeño del sistema, ya que, se deben implementar altos valores de ganancia de salida del amplificador del orden de los 30 dB para que cambie el régimen de propagación de tipo lineal a no lineal, los parámetros de monitoreo óptico se fijan en una  $BER=1e^{-40}$ , un factor  $Q=38.46$  dB, potencia en recepción alrededor de los -14.51 dBm y una OSNR de 29.46 dB.



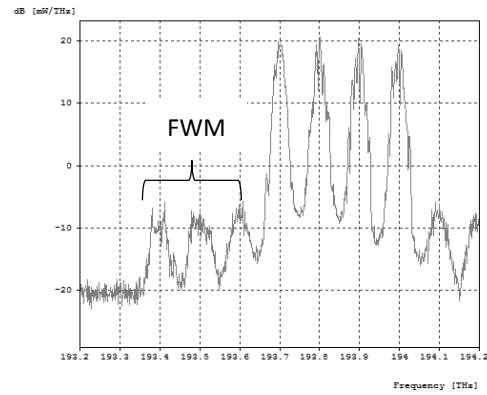
**Figura 11 (a)** Salida modulada para una ganancia de salida de 0 dB en el EDFA



**Figura 11 (b)** Espectro óptico en recepción para una ganancia de salida de 0 dB en el EDFA



**Figura 11 (c)** Salida modulada para una ganancia de salida de 30 dB en el EDFA



**Figura 11 (d)** Espectro óptico en recepción para una ganancia de salida de 30 dB en el EDFA

### 3.2. Medida de la Eficiencia Espectral en una arquitectura de red XGS-PON implementando formatos avanzados de Modulación.

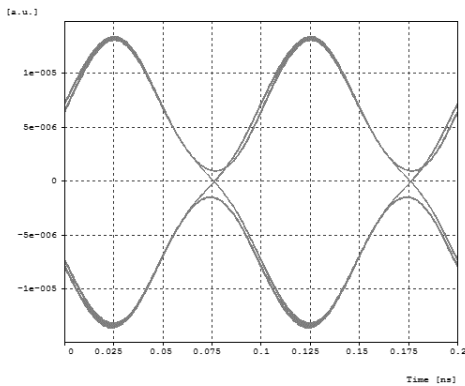
Una vez establecidas las características de potencia y ganancia del sistema óptico, garantizando un régimen de propagación predominantemente lineal y con la finalidad de aplicar la ecuación (5), se procederá a realizar una medición de la eficiencia espectral máxima alcanzable implementado el esquema de Modulación RZ-DPSK. las variables de medición son:

- i)  $C_N$ , Capacidad nominal por longitud de onda: se presenta como la capacidad individual propagada a nivel de acceso;
- ii)  $C_{TOT}$ , Capacidad total del sistema: se presenta como la sumatoria de las capacidades individuales de los canales propagados a nivel de transporte;
- iii)  $C_{PRO}$ , Capacidad de propagación de información por kilómetro: se presenta como la relación entre la cantidad de información y la distancia propagada;
- iv)  $\eta_{ded}$ , Eficiencia espectral dedicada por longitud de onda: se presenta como una relación neta entre la capacidad nominal y el ancho de banda ocupado;
- v)  $(N - 1)\Delta_\nu$ , Espaciamiento Óptico de los canales adyacentes;
- vi)  $\eta_{dist}$  – Eficiencia espectral distribuida teórica del sistema: se presenta como una relación de la capacidad total generada en el sistema vs el espaciamiento óptico.

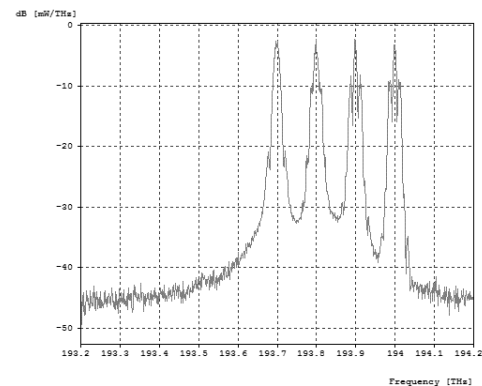
Variables de medición y Control – Arquitectura de Red XGS-PON					
$(N - 1)\Delta_v$	$C_N$	$C_{TOT}$ 4ch x 10Gbps	$C_{PRO}$ Distancia 80Km	$\eta_{ded}$ 0.04Thz	$\eta_{dist}$
100Ghz	10Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	0.4 [bps/Hz]
50Ghz	10Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	25% [bps/Hz]	0.8 [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_v$	BER	FACTOR Q	OSNR	$S_{RX}$	
100Ghz	$1e^{-40}$	40.00dB	48.41dB	-23.5dBm	
50Ghz	$1e^{-40}$	35.09dB	18.74dB	-24.6dBm	

**Tabla 2.** Eficiencia Espectral teórica de la arquitectura de red XGS-PON

Como se aprecia en los resultados teóricos obtenidos en la tabla 2, es posible alcanzar una eficiencia espectral de aproximadamente el 80% manteniendo un régimen de propagación lineal y unos parámetros de desempeño óptico ideales, sin embargo, el objetivo es lograr la máxima eficiencia espectral controlando el parámetro  $(N - 1)\Delta_v$ . La tabla 3 resume el desempeño del sistema óptico como un resultado de la aplicación de la ecuación (5), en la cual se asocia una capacidad total de la red con respecto a la ocupación del ancho de banda de los canales propagados, haciendo que los espaciamientos sean forzados a distancias mínimas de 50 Ghz, incrementado la densidad de portadoras por unidad de ancho de banda, alcanzando una eficiencia espectral distribuida  $\eta_{disa}$  de más del 22%. Las figuras 12(a) a 12(d) demuestran el comportamiento del sistema.

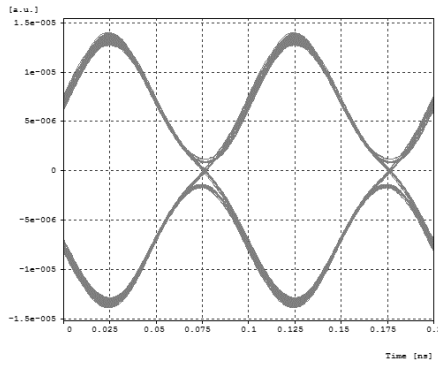


**Figura 12 (a)** Diagrama del Ojo para un  $(N - 1)\Delta_v = 100\text{Ghz}$

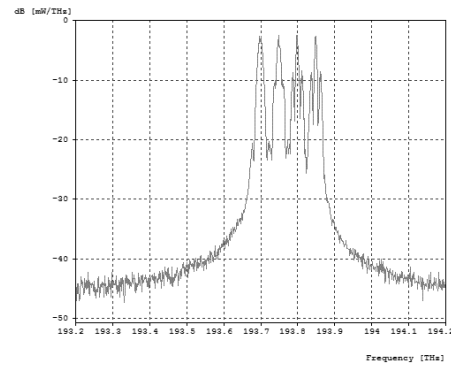


**Figura 12 (b)** Espectro de la señal para un  $(N - 1)\Delta_v = 100\text{Ghz}$





**Figura 13 (a)** Diagrama del Ojo para un  $(N - 1)\Delta_v = 50\text{GHz}$



**Figura 13 (b)** Espectro de la señal para un  $(N - 1)\Delta_v = 50\text{GHz}$

Variables de medición y Control - 4 canales de 10Gbps Analíticas					
$(N - 1)\Delta_v$	$C_N$	$C_{TOT}$ 4ch x 10Gbps	$C_{PRO}$ Distancia 80Km	$Bw$ Total Ocupado	$\eta_{disa}$ [bps/Hz]
50GHz	10Gbps	40Gbps	3.2Tbps*Km	180 GHz	22.2% [bps/Hz]
Parámetros de monitoreo óptico					
$(N - 1)\Delta_v$	BER	FACTOR Q	OSNR	$S_{RX}$	
50GHz	$1e^{-40}$	34.66dB	18.73dB	-19.49dBm	

**Tabla 3.** Eficiencia Espectral adaptada para una arquitectura de red XGS-PON.

#### 4. Conclusiones

Con la realización del presente artículo, se determinó que mediante la implementación del formato de modulación RZ-DPSK para una arquitectura de red XGS-PON, es posible alcanzar una eficiencia espectral máxima del 22%, aplicando la ecuación adaptada de la teoría de la información a un espaciamiento mínimo de 50 GHz mantenido los parámetros de monitoreo óptico BER, Factor Q y OSNR dentro de los límites normales. Del mismo modo, mediante la configuración propuesta para la arquitectura desarrollada, se demostró que lograr una propagación paralela de los canales propagantes, genera un incremento significativo en la capacidad de la red sin sacrificar ningún ancho de banda adicional, permitiendo alcanzar altas eficiencias espectrales.

## Reconocimientos

El autor expresa sus agradecimientos Al comité de programa de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca por sus aportes y recomendaciones, al grupo de investigación GNTT – Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones de la universidad del Cauca por su colaboración y consejos en el desarrollo del presente artículo.

## Referencias

- [1] H. S. Abbas, M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review", *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 67, pp. 53-74, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>
- [2] I. M. Mohamed, M. S. B. Ab-Rahman, "Options and challenges in next-generation optical access networks (NG-OANs)" *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 126, no. 1, pp. 131-138, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.08.131>
- [3] K. Borzycki, "FTTx Access Networks: Technical Developments and Standardization. In Broadband Communications Networks-Recent Advances and Lessons from Practice", IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71785>
- [4] E. Lach, W. Idler, "Modulation formats for 100G and beyond", *Optical Fiber Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 377-386, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2011.07.012>
- [5] K. Tanaka, A. Agata, Y. Horiuchi, "IEEE 802.3 av 10G-EPON standardization and its research and development status", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 651-661, 2010. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2038722>
- [6] S. D. N., UIT, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics", Recommendation ITU-T G. 984.1, Ginebra, 2008
- [7] S. D. N., UIT, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements", Recommendation ITU-T G. 989.1, Ginebra, 2013.
- [8] S. D. N., UIT, "10 Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Reach extensión", Recommendation UIT-T. G 987.4, Ginebra, 2012.
- [9] S. D. N., UIT, "10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)", Recommendation UIT-T. G. 9807.1, Ginebra, 2016.
- [10] S. D. N., UIT, "10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON): Reach extensión", Recommendation UIT-T. G. 9807.2, Ginebra, 2017.
- [11] A. Kaur, M. L. Singh, A. Sheetal, "Simulative analysis of co-existing 2.5 G/10 G asymmetric XG-PON system using RZ and NRZ data formats", *Optik-International*

*Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 14, pp. 3637-3640, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.01.074>

- [12] FSAN - Full Service Access Network, "comité desarrollador UIT", Página Web disponible en: <https://www.fsan.org/>
- [13] L. Tao, Y. Ji, J. Liu, et al., "Advanced modulation formats for short reach optical communication systems", *IEEE network*, vol. 27, no. 6, pp. 6-13, 2013.  
<https://doi.org/10.1109/MNET.2013.6678921>
- [14] L. N. Binh, "Optical fiber communication systems with Matlab and Simulink models". CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/b17781>
- [15] L. Liao, D. Samara-Rubio, M. Morse, et al., "High speed silicon Mach-Zehnder modulator", *Optics Express*, vol. 13, no. 8, pp. 3129-3135, 2005.  
<https://doi.org/10.1364/OPEX.13.003129>
- [16] S. Zhang, "Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System", Doctoral dissertation, University of Kansas, Electrical Engineering and Computer Science, 2004.
- [17] I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner, "Optical fiber telecommunications VB: systems and networks", Elsevier, 2010.
- [18] D. D. van den Borne, "Robust optical transmission systems: modulation and equalization", Doctoral dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, 2008.  
<https://doi.org/10.1109/OFC.2008.4528385>
- [19] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423, October 1948. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x>
- [20] H. Simon, "Sistemas de Comunicación", Madrid, España. Segunda edición, Limusa Wiley, ISBN 968-18-6307-0, 2001.
- [21] J. G. Proakis, "Digital communications", McGraw-Hill, New York, 2007.
- [22] R. G. Gallager, "Information theory and reliable communication", New York: Wiley, 1968.
- [23] J. M. Kahn, K. P. Ho, "Ultimate spectral efficiency limits in DWDM systems. In Proc. Optoelectronics Communications" Conference, pp. 8-12, July 2002.
- [24] K. P. Ho, J. M. Kahn, "Channel capacity of WDM systems using constant-intensity modulation formats", In Optical Fiber Communication Conference (p. ThGG85). Optical Society of America, March 2002.
- [25] A. Mecozzi, M. Shtaif, "On the capacity of intensity modulated systems using optical amplifiers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 1029-1031, 2001.  
<https://doi.org/10.1109/68.942683>

- [26] E. E. Narimanov, P. Mitra, "The channel capacity of a fiber optics communication system: Perturbation theory", *Journal of lightwave technology*, vol. 20, no. 3, p. 530, 2002. <https://doi.org/10.1109/50.989004>
- [27] P. P. Mitra, J. B. Starkm, "Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications", *Nature*, vol. 411, no. 6841, p. 1027, 2001. <https://doi.org/10.1038/35082518>
- [28] G. Gómez, "Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40Gbps a través de los formatos de modulación avanzados DPSK y DQPSK", Tesis de Maestría, Universidad del Cauca, 2019.
- [29] G. Gómez, "Adaptación de la Teoría de la Información para el régimen de propagación lineal de una red óptica DWDM de Próxima Generación", Lámpsakos, 2019.