

# Impacto de los efectos lineales y no lineales en el requerimiento del ancho de línea del transmisor en sistemas WDM-DPSK

---

## Impact of Linear and Nonlinear Effects in the Requirements of the Transmitter Linewidth for WDM-DPSK Systems

**JESÚS ÁLVAREZ-GUERRERO**

Candidato a Magister en TIC  
Universidad Pontificia Bolivariana  
jesus.alvarezg@upb.edu.co  
Medellín, Colombia

**FERNEY AMAYA-FERNÁNDEZ**

PhD en Ingeniería de Telecomunicaciones  
Universidad Pontificia Bolivariana  
ferney.amaya@upb.edu.co  
Medellín, Colombia

*Fecha de recibido: 22/12/2014*  
*Fecha de aceptado: 22/06/2015*

*Forma de citar/How to cite:* ÁLVAREZ, Jesús y AMAYA, Ferney. Impacto de los efectos lineales y no lineales en el requerimiento del ancho de línea del transmisor en sistemas WDM-DPSK. Rev. UIS Ingenierías, 2015, vol. 14, no 2, p.p. 35-45.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revuin.v14n2-2015004>



### RESUMEN

En este documento se analiza el impacto en los requerimientos del ancho de línea del láser debido a los efectos lineales y no lineales introducidos por la fibra óptica en un sistema de transmisión WDM-PON con formato de modulación DPSK. Se analizó el impacto del ancho de línea del láser sobre el BER variando la potencia transmitida y el coeficiente de dispersión de la fibra óptica, que inciden directamente en las linealidades y no linealidades de la fibra óptica. El estudio se realizó mediante simulaciones en la herramienta computacional OPTSIM<sup>®</sup>. Se encontró que al incrementar la tasa de transmisión es posible utilizar fuentes ópticas con un mayor ancho espectral utilizando el formato de modulación DPSK reduciendo el costo del transmisor. Adicionalmente se comprobó que los efectos no lineales afectan en mayor medida los sistemas de transmisión cuando se utilizan fibras ópticas con coeficientes de dispersión cercanos a cero.

**PALABRAS CLAVE:** Ancho de línea, DPSK, Efectos lineales y no lineales, WDM-PON

### ABSTRACT

In this paper we analyze the impact in the requirements of the linewidth of the laser, due to the linear and non-linear effects introduced by the optical fiber, in a WDM-PON transmission system using DPSK modulation format. We measured the BER for different data bit rates, transmitted power and dispersion coefficient of the optical fiber. The study was performed using simulations in the computational tool OPTSIM<sup>®</sup>. We found that if the data bit rate is increased, it is possible to use optical sources with higher linewidth using DPSK modulation format, decreasing the cost of the transmitter. Additionally, we proved that the non-linear effects mostly affect the transmission systems where optical fibers with dispersion coefficients near zero are used.

**KEYWORDS:** Linewidth, DPSK, Linear and nonlinear effects, WDM-PON.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las ciudades del mundo han empezado a migrar hacia Modelos de Ciudades Inteligentes. Esto ha traído consigo el despliegue de una enorme cantidad de sensores en las ciudades y la explotación de las tecnologías de la información y comunicación con el fin de recopilar y gestionar la información de los diferentes subsistemas de ciudad permitiendo que la infraestructura y los servicios públicos sean más interactivos, accesibles y eficientes (Belleville et al., 2014; Pellicer et al., 2013).

Partiendo de este concepto, se considera que las Ciudades Inteligentes generarán flujos gigantescos de información provenientes de los sensores desplegados por la ciudad, que en conjunto con los flujos generados por recientes aplicaciones como el video 3D, el video bajo demanda y el video de ultra alta definición (UHDTV, Ultra High Definition TeleVision), demandarán un gran ancho de banda, planteando la necesidad de una red de acceso que soporte tasas de transmisión de varios Gbps por usuario final (Zhu et al., 2015; Hussain et al., 2013).

Para satisfacer los requerimientos de ancho de banda y latencia, las tecnologías de acceso que se ajustan a estos requerimientos son las basadas en fibra óptica. Al respecto, la tecnología de red óptica pasiva (PON, Passive Optical Network) ha sido ampliamente desplegada en varios países del mundo. En Colombia, algunos operadores de telecomunicaciones vienen ofreciendo a sus usuarios la tecnología PON con capacidad de Gigabit (G-PON, Gigabit-Capable Passive Optical Network). Esta tecnología estandarizada por la ITU en la recomendación G.984.3 (01/14), ofrece una tasa de bits máxima de 2.5 Gbps que puede ser compartida en el tiempo entre 64 o 128 usuarios en un esquema de multiplexación por división en el tiempo (TDM-PON, Time Division Multiplexed-PON).

Para ofrecer un ancho de banda por usuario final de varios Gbps, se ha planteado el uso de multiplexación por división en la longitud de onda (WDM-PON, Wavelength Division Multiplexed-PON) (Zhu et al., 2015; Chow y Yeh, 2013; AHSAN et al., 2011; Lin, 2008; Ling et al., 2010; Wong, 2012), ofreciendo ventajas como transparencia en el protocolo y tasa de bits, seguridad a nivel de la capa física y la facilidad de actualización y gestión de la red (Wong, 2012; Zhao et al., 2007). Sin embargo, además de los mayores costos, las señales ópticas en sistemas WDM-PON sufren en gran medida los efectos lineales y no lineales al propagarse por la fibra óptica. Estos efectos imponen grandes limitaciones en cuanto al alcance de la red, la potencia de transmisión y la máxima tasa de transmisión de datos (Hussain et al., 2013).

Para tasas de transmisión de hasta 10 Gbps y distancias de transmisión de acceso, los fenómenos de propagación de la fibra no afectan en gran medida las señales. Esto por cuanto no necesariamente 10 Gb/s se usa en redes de acceso. Para tasas superiores se han propuesto formatos de modulación avanzados como modulación en fase de la señal óptica y el uso de OFDM en el acceso con el fin de mejorar la tolerancia a los efectos de propagación, a la vez que ofrecen una alta eficiencia espectral (Chenyang y Wei, 2011).

Actualmente, el formato de modulación más utilizado en sistemas WDM-PON es el de intensidad On-Off (OOK, On-Off Keying). Aunque la tecnología XG-PON1 ya está definida, aún está en definición la tecnología XG-PON2 y varias propuestas existen al respecto (Huawei, 2010). Sin embargo, se ha demostrado que la modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK, Differential Phase Shift Keying) tiene ventajas significativas sobre OOK en cuanto a la tolerancia a los efectos no lineales y a la dispersión cromática (Latal et al., 2014).

En (Chenyang y Wei, 2011) se realizó una comparación del desempeño de varios formatos de modulación incluyendo DPSK, modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK, Frequency-Shift Keying), retorno a zero invertido (IRZ, Inverted Return-to-Zero) y Manchester. Los resultados mostraron que el formato de modulación DPSK ofrece el mejor desempeño en la transmisión de datos en el canal descendente ya que con este formato de modulación se obtuvo una mejora de 3 dB en la curva de la sensibilidad del receptor con respecto a la potencia de transmisión y también de 3 dB respecto a la dispersión cromática.

Por otro lado, uno de los aspectos clave que se considera en el diseño de sistemas WDM-PON es la reducción de costos de implementación. En este aspecto, recientemente se han propuesto arquitecturas WDM-PON utilizando una fuente óptica en la Unidad Óptica Terminal de Línea (OLT, Optical Line Terminal) ubicada en la oficina central (CO, Central Office) y la reutilización de la portadora óptica del canal descendente para modular la información del canal ascendente. De esta manera se elimina la necesidad de un láser en cada unidad de red óptica (ONU, Optical Network Unit) y surge una nueva alternativa para reducir los costos en el lado del cliente (Kuymar y Janyani, 2013).

Esta técnica de remodulación está siendo estudiada en sistemas de alta capacidad, incluso ya se han propuesto varios esquemas con resultados satisfactorios en los que se utiliza modulación DPSK en el canal descendente

(Kumar y Janyani, 2015; Hussain et al., 2013; Chow y Yeh, 2013; Han et al., 2012; Hussain et al., 2012; Nai y Dong, 2011; Emsia et al., 2012).

En este trabajo se presenta un análisis, mediante simulaciones, del impacto de los efectos lineales y no lineales de la fibra óptica en el diseño de un sistema de transmisión con portadora única y su posterior expansión a WDM-PON, utilizando formato de modulación DPSK en el canal descendente. Para analizar el efecto de la dispersión las pruebas se realizaron con tres tipos de fibra óptica monomodo: fibra tipo estándar (SSMF, Standard Single Mode Fiber), fibra de dispersión desplazada (DSF, Dispersion Shifted Fiber) y fibra de dispersión desplazada no nula (NZ-DSF, Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Las velocidades de transmisión varían entre 1,25 y 40 Gbps. Para analizar el efecto de las no linealidades se realizaron pruebas con una, tres y cinco longitudes de onda, con potencias de transmisión de 0 y 10 dBm. La estimación del impacto producido por los efectos de propagación se realizó mediante el análisis de la penalidad del ancho de línea de la fuente óptica contenida en la OLT.

Se considera que los resultados presentados en este documento aportan una referencia para el diseño de las recientes arquitecturas WDM-PON que utilizan esquemas de remodulación en la ONU y formato de modulación DPSK en el canal descendente, ya que se provee información acerca de cómo los efectos de propagación en la fibra impactan estos sistemas a medida que se incrementa el número de longitudes de onda, se varía la dispersión de la fibra óptica, la tasa de transmisión y la potencia de transmisión. Esto considerando la adopción de DPSK como la tecnología empleada en XG-PON2. El desarrollo de propuestas conducentes a incrementar la capacidad y disminuir los costos en la red de acceso tiene un efecto importante en países como Colombia. Esto porque una mayor cobertura del servicio depende de los costos asociados a la implementación de nuevas tecnologías.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sesión 2 se describe teóricamente la arquitectura WDM-PON y el esquema de modulación de fase DPSK, en la sesión 3 se presenta la descripción del escenario de simulación, en la sesión 4 se realiza el análisis del requerimiento de ancho de línea en el láser debido a la dispersión cromática, en la sesión 5 se realiza el análisis del requerimiento de ancho de línea debido a los efectos no lineales de la fibra óptica y finalmente en la sesión 6 se presentan las conclusiones.

## 2. SISTEMAS WDM-PON CON MODULACIÓN EN FASE ÓPTICA DIFERENCIAL

### 2.1. WDM-PON

En la Figura 1 se presenta la arquitectura de un sistema WDM-PON que proporciona un enlace óptico punto a punto mediante la asignación de un par de longitudes de onda bidireccionales entre cada ONU y la OLT conectados a la PON (AHSAN et al., 2011). En la Figura 1,  $N$  número de ONUs reciben las longitudes de onda  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  del canal descendente (Downstream) y posteriormente transmiten las señales  $\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_N$  en el canal ascendente (Upstream). La capacidad de estas longitudes de onda se dedica exclusivamente a cada ONU (Wong, 2012). Debido a esto WDM-PON ofrece varias ventajas sobre TDM-PON, como un gran ancho de banda, transparencia en el protocolo, mayor seguridad y escalabilidad.

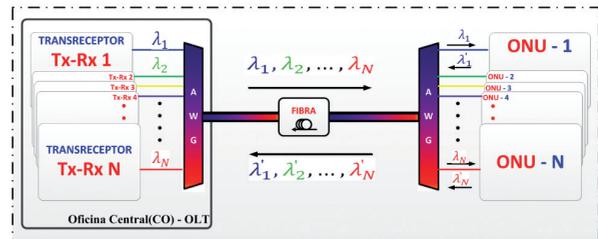


Figura 1. Esquema típico de una red WDM-PON.

### 2.2. Modulación DPSK con Detección Diferencial

La modulación DPSK es un tipo de modulación en el cual la información modula la fase de la portadora óptica. Un modulador DPSK consiste básicamente en un codificador diferencial y un modulador de fase. La secuencia de bits se codifica diferencialmente en la diferencia de fase de dos bits sucesivos utilizando una compuerta XOR de la siguiente forma:

$$d_k = b_k \text{XOR} d_{k-1} \quad (1)$$

En esta ecuación, el subíndice  $k$  indica el número del bit,  $b$  es la secuencia de bits de entrada y  $d$  es la secuencia codificada diferencialmente. La señal eléctrica codificada diferencialmente modula la fase de un láser de onda continua utilizando un dispositivo externo que comúnmente es un modulador Mach Zehnder. El campo eléctrico de la señal óptica a la salida del transmisor está representado por la ecuación:

$$E_s(t) = \sqrt{P_s} \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} \cdot e^{j \frac{u(t)}{V_\pi} \pi} \quad (2)$$

En esta ecuación  $\sqrt{P_s}$  es la amplitud,  $\omega_s$  es la frecuencia angular,  $\varphi_s$  es la fase inicial del campo eléctrico de la señal óptica y  $V_\pi$  es el voltaje a la entrada del modulador de fase que produce un cambio de  $\pi$  radianes en la fase de la señal óptica (Seimetz, 2009). La señal eléctrica de control  $u(t)$  está dada por la ecuación 3, donde  $d_k$  es el valor del bit que puede ser 0 o 1,  $T_s$  es el tiempo de símbolo y  $p(t)$  es la forma del pulso. El valor de  $u(t)$  puede ser 0 o  $V_\pi$  dependiendo del valor de  $d_k$ , de tal manera que la fase de salida se da de acuerdo con la regla XOR.

$$u(t) = V_\pi * \sum_k (d_k * p(t - kT_s)) \quad (3)$$

El receptor diferencial se puede observar en la etapa de recepción del esquema mostrado en la Figura 2. En este tipo de detección se emplea un interferómetro de línea de retardo DLI, Delay Line Interferometer) que puede estar conformado por un interferómetro Mach Zehnder MZI, Mach Zehnder Interferometer) o un interferómetro de Michelson. El DLI divide la señal óptica DPSK en dos rayos de igual intensidad uno retrasado respecto al otro un tiempo de bit. Las dos señales van a un par de fotodetectores balanceados, posteriormente se combinan y se obtiene una interferencia constructiva si la diferencia de fase entre los dos rayos es cero; o destructiva en caso contrario (Kaminow et al., 2008). De esta manera se utiliza como referencia de fase la misma señal, lo que hace este método más simple y menos costoso que el detector coherente, donde es necesario mezclar la señal con un oscilador local, como ocurre en la detección coherente.

### 2.3. Ancho de línea en la modulación de fase diferencial

Los ruidos de amplitud y fase tienen sus orígenes en la emisión espontánea de fotones (Seimetz, 2009), induciendo fluctuaciones de potencia  $\delta P(t)$  y fluctuaciones de fase  $\varphi_{n_s}(t)$ , que si se consideran en el campo eléctrico a la salida del transmisor DPSK, la ecuación 2 se modifica de la siguiente forma:

$$E_s(t) = \sqrt{P_s + \delta P(t)} \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_s + \varphi_{n_s}(t))} \cdot e^{j \frac{u(t)}{V_\pi} \pi} \quad (4)$$

La varianza del ruido de fase dentro de un intervalo  $\tau$  se muestra en la ecuación 5, donde  $W_{\varphi_{n_s}}$  es la densidad espectral de potencia fija del ruido de frecuencia y  $t_c$  representa el tiempo de coherencia, el cual denota la diferencia máxima del retardo entre dos secuencias de bit en el tiempo  $\tau$  (Seimetz, 2009).

$$\langle \Delta \varphi_{n_s}^2(\tau) \rangle = W_{\varphi_{n_s}} * |\tau| = 2 |\tau| / t_c \quad (5)$$

Puede modelarse la densidad espectral de la señal del láser con una función con distribución de Lorentz. En este caso, el ancho de línea del láser se define como el ancho

a la mitad de la densidad de potencia máxima (FWHM, Full-Width Half-Maximum) y se especifica mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta \nu_s = W_{\varphi_{n_s}} / 2\pi = 1 / (\pi t_c) \quad (6)$$

Reemplazando la densidad espectral de potencia fija presentada en la ecuación 6 en la ecuación 5, la varianza del ruido de fase puede ser calculado por la ecuación 7:

$$\langle \Delta \varphi_{n_s}^2(\tau) \rangle = 2\pi \Delta \nu_s |\tau| \quad (7)$$

De la ecuación 7 puede observarse que la incertidumbre de fase incrementa con el ancho de línea del láser  $\Delta \nu_s$ , y con el intervalo de tiempo observado  $\tau$ . La penalidad del sistema de comunicación debido a fluctuaciones del láser depende del formato de modulación. Para el formato DPSK, el tiempo de coherencia  $t_c$  en función del tiempo de bit  $T_b$  y debe satisfacerse  $t_c \gg 2T_b$ . El mínimo valor del tiempo de coherencia en función de la tasa de bits  $R$  es:

$$t_c = 2/R \quad (8)$$

El valor máximo de ancho de línea en términos de la tasa de bits se expresa como:

$$\Delta \nu_s = R / (2\pi) \quad (9)$$

El ancho de línea inicial se modifica por la dispersión y las no linealidades en la propagación de la señal a través de la fibra óptica. Sin embargo, el formato de modulación DPSK es más robusto a las no linealidades así como a la dispersión cromática comparada con la modulación de intensidad (Emsia et al., 2012).

### 2.4. Efectos Lineales y No Lineales en Sistemas WDM-PON

Las señales en WDM-PON son afectadas por los efectos lineales y no lineales de la fibra óptica. La dispersión cromática (CD, Chromatic Dispersion) es un efecto lineal que limita el alcance y la tasa de bits y es considerada como la limitación más influyente en los sistemas de comunicaciones ópticos. La CD produce un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos causando Interferencia entre símbolos (ISI, Intersymbol Interference) (Álvarez et al., 2011).

En WDM-PON aumenta la sensibilidad a los efectos no lineales debido a la transmisión de varias longitudes de onda por la misma fibra con niveles de potencia significativos. Los principales fenómenos que afectan los sistemas WDM-PON son la automodulación de fase (SPM, Self-Phase Modulation), la modulación cruzada de fase

(XPM, Cross-Phase Modulation) y el mezclado de cuatro ondas (FWM, Four-wave Mixing)(Reis et al., 2010).

A diferencia de la CD, La SPM se produce debido a la variación del índice de refracción, en función de la intensidad en un medio óptico no-lineal. Ese fenómeno lleva al alargamiento o encogimiento espectral de los pulsos ópticos (Agrawal, 2001). XPM y FWM aparecen cuando las diferentes longitudes de onda o canales interactúan entre sí. XPM siempre está acompañada por la modulación SPM y se produce debido a que el índice de refracción eficaz visto por un pulso óptico en un medio no lineal depende no sólo de la intensidad de ese pulso, sino también de la intensidad de otros pulsos de copropagación (Agrawal, 2001). El fenómeno de FWM consiste en la creación de nuevas frecuencias a partir de las frecuencias de los canales transmitidos en un sistema WDM.

En general estos efectos degradan las señales ópticas multiplexadas y condicionan el desempeño óptimo de los sistemas WDM-PON. En este documento se analiza el impacto de los efectos no lineales en conjunto sobre el requerimiento de ancho de línea de la fuente óptica de la OLT para garantizar un determinado valor de BER. No se realiza el análisis del impacto de un efecto no lineal en particular.

### 3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

El escenario de simulación utilizado para el análisis de los requerimientos de ancho de línea, debido a los efectos de propagación de la fibra en WDM-PON, se implementó en el simulador OPTSIM con los componentes que se presentan en la Figura 2.

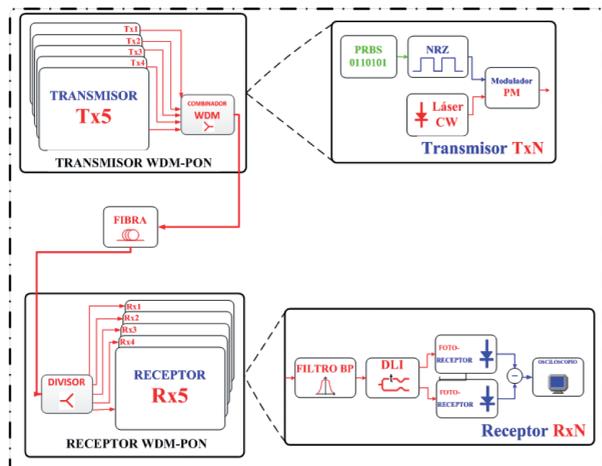


Figura 2. Esquema general de un sistema WDM-PON con modulación DPSK y detección diferencial.

El transmisor óptico está formado por un láser de onda continua que emite a una longitud de onda de  $1550nm$  y potencia óptica variable entre  $0$  y  $10dBm$ . Para simular la información a transmitir se utilizó un generador de secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS, Pseudo-Random Binary Sequence) con tasas de transmisión de  $1,25, 2,5, 10, 20$  y  $40Gbps$ . En el transmisor se asume que la salida del PRBS se encuentra codificada en forma diferencial.

La información es codificada en No-Retorno a Zero (NRZ, Non-Return to Zero) y esta señal eléctrica modula la fase de la señal óptica utilizando un modulador electro-óptico Mach Zehnder (MZM, Mach Zehnder Modulator), con  $V_{\pi}$  igual a  $4V$ .

El canal óptico es de  $20km$  de longitud y se realizaron pruebas con tres tipos de fibra óptica monomodo con diferentes valores de dispersión: SSMF (Standard Single Mode Fiber), NZ-DSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) y DSF (Dispersión Shifted Fiber). En la Tabla 1 se presentan los parámetros de atenuación y dispersión de los tres tipos de fibra óptica utilizados en la simulación.

Tabla 1. Parámetros de las fibras utilizadas (Corning SMF-28, Corning LEAF).

Tipo de Fibra	Atenuación (dB/km)	Dispersión (ps/nm - km)
SSMF	0,28	17,0
NZ-DSF	0,28	4,4
DSF	0,35	0,0

El receptor óptico está formado por un filtro óptico pasa banda, un DLI y un par de fotodetectores PIN balanceados. Se ajustó un valor de responsividad de  $1,6A/W$  y ruido térmico de  $10^{-12}A/Hz^{1/2}$ . La señal eléctrica demodulada es analizada en el tiempo empleando un osciloscopio.

Para analizar el efecto de la dispersión cromática y de las no linealidades se realizaron pruebas con  $1, 3$  y  $5$  longitudes de onda en la banda C, con un espaciado de  $100GHz$ . Las pruebas se realizaron para los tres tipos de fibras con diferentes tasas de bits. Como parámetro de desempeño se analiza el efecto del ancho de línea sobre el BER.

### 4. REQUERIMIENTOS DE ANCHO DE LÍNEA DEBIDO A LA DISPERSIÓN

Para el análisis de los requerimientos de ancho de línea debido a la CD, se realizaron pruebas con los tres tipos

de fibras ópticas descritos en la Tabla 1. El láser se configuró con una potencia de transmisión de 0 dBm para minimizar el efecto de las no linealidades.

Inicialmente se propuso el análisis a tasas de transmisión de 1,25, 2,5, 10, 20 y 40Gbps. Sin embargo, cuando se realizaron las pruebas con las tasas de transmisión de 1,25 y 2,5Gbps se obtuvo que para lograr un BER de  $1 \times 10^{-9}$  se requiere un ancho de línea de 75MHz y 130MHz, respectivamente utilizando cualquiera de los tres tipos de fibra. En el caso de 40Gbps se logró un BER de  $1 \times 10^{-9}$  con un ancho de línea de 1,6GHz solo con la fibra DSF, con las fibras NZ-DSF y SSMF el mejor BER obtenido fue de  $9,2 \times 10^{-8}$  y  $2,28 \times 10^{-2}$  respectivamente, utilizando un ancho de línea ideal de 0Hz. Por esta razón, se consideró que los resultados obtenidos a estas tasas de transmisión no son relevantes para el propósito de este documento y por lo tanto el análisis se enfocó en los resultados obtenidos con tasas de transmisión de 10 y 20Gbps.

En la Figura 3 se presentan las curvas de BER en función del ancho de línea del láser del OLT, utilizando fibras SSMF, NZ-DSF y DSF para 1, 3 y 5 longitudes de onda a una velocidad de transmisión de 10Gbps.

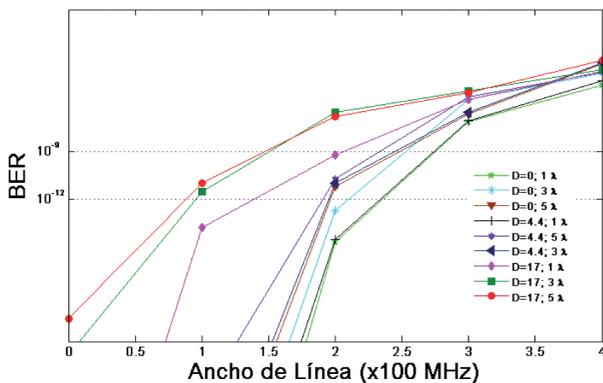


Figura 3. BER en función del ancho de línea a 10 Gbps con potencia de transmisión de 0 dBm y 20 km de fibras DSF, NZ-DSF y SSMF.

De los resultados mostrados en la Figura 3 se puede determinar el máximo valor de ancho de línea permitido para garantizar un nivel de BER de  $1 \times 10^{-12}$  con los tres tipos de fibra. Estos valores se resumen en la Tabla 2.

De los resultados se observan dos comportamientos con respecto al ancho de línea de la fuente óptica. Por un lado se observa que al utilizar fibras con mayor dispersión se requiere un menor ancho de línea. Esto ocurre porque la dispersión, al ensanchar los pulsos, incrementa el tiempo de coherencia. Este mismo comportamiento se observó en los escenarios con tres y cinco longitudes de onda.

Tabla 2. Máximo Ancho de Línea permitido para obtener un  $BER = 1 \times 10^{-12}$  a 10Gbps en WDM-PON con diferentes tipos de fibras.

Longitudes de onda	Tipo de Fibra	Máximo Ancho de Línea permitido (MHz)
1	DSF	220
	NZ-DSF	219
	SSMF	118
3	DSF	204
	NZ-DSF	188
	SSMF	94
5	DSF	194
	NZ-DSF	192
	SSMF	85

Por otro lado, también se presenta una penalidad en el ancho de línea cuando se incrementa el número de longitudes de onda. Esto se debe a que a pesar de utilizar una potencia de 0 dBm en cada portadora óptica, al combinar las tres o cinco portadoras ópticas se obtiene unos niveles de potencia acumulada de 4.7 y 7 dBm respectivamente en el transmisor, generando efectos no lineales sobre las señales transmitidas a través de la fibra óptica. En la Figura 4 se presentan las curvas de BER en función del ancho de línea del láser del OLT, utilizando fibras SSMF, NZ-DSF y DSF para 1, 3 y 5 longitudes de onda a una velocidad de transmisión de 20 Gbps.

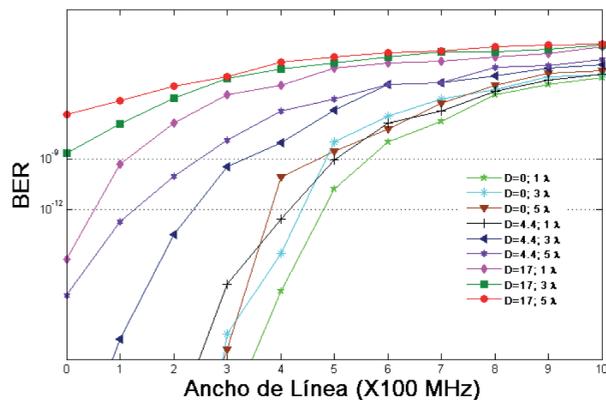


Figura 4. BER en función del ancho de línea a 20 Gbps con potencia de transmisión de 0 dBm y 20 km de fibras DSF, NZ-DSF y SSMF.

Analizando los resultados presentados en la Figura 4 se pueden obtener los valores presentados en la Tabla 3 que corresponden a los máximos anchos de línea requeridos por el láser del OLT para garantizar un BER de  $1 \times 10^{-12}$  a 20 Gbps con los tres tipos de fibra óptica.

Al comparar los valores presentados en la Tabla 3 obtenidos a 20 Gbps con los valores obtenidos a 10 Gbps se puede comprobar que el máximo ancho de línea permitido en la modulación DPSK es proporcional a la tasa de bits, ya que los valores permitidos a 20 Gbps son aproximadamente el doble de los permitidos a 10 Gbps para las fibras DSF y NZ. Este comportamiento comprueba lo expresado en la ecuación 9 de la sección II.C, que al disminuir el tiempo de coherencia se incrementa el ancho de línea para la modulación DPSK.

**Tabla 3. Máximo Ancho de Línea permitido para obtener un BER de  $1 \times 10^{-12}$  a 20 Gbps en WDM-PON con diferentes tipos de fibras.**

Longitudes de onda	Tipo de Fibra	Máximo Ancho de Línea permitido (MHz)
1	DSF	475
	NZ-DSF	415
	SSMF	49
3	DSF	437
	NZ-DSF	234
	SSMF	-
5	DSF	375
	NZ-DSF	125
	SSMF	-

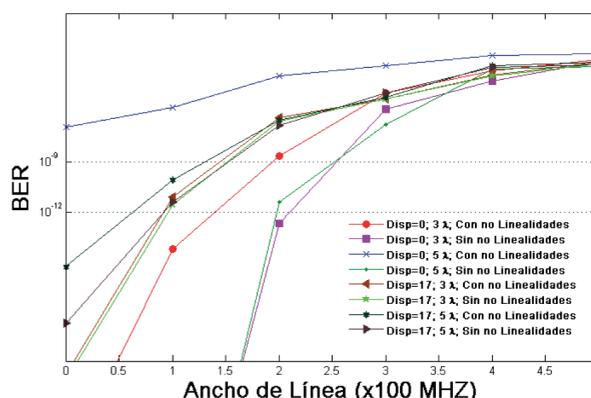
De igual manera, se observa que al aumentar la velocidad de transmisión, es decir a 20 Gbps, la información se vuelve más sensible a la dispersión. Esto se evidencia al observar los bajos valores de ancho de línea requeridos con la fibra SSMF.

Los resultados muestran que no es posible recuperar la información cuando se transmiten 3 o más portadoras ópticas a 20 Gbps, utilizando una fibra óptica SSMF ni siquiera utilizando un láser ideal (de ancho de línea igual a 0 Hz). En teoría, el requerimiento de ancho de línea con 3 y 5 longitudes de onda debió mantenerse igual que en el caso de una sola longitud de onda, ya que la CD no depende del número de portadoras ópticas. Sin embargo, como se mencionó anteriormente la potencia acumulada de las 3 y 5 portadoras ópticas es lo suficientemente alta para excitar algunos efectos no lineales que producen degradaciones en la señal que en este caso se ve reflejado en el requerimiento de un menor ancho de línea. Este mismo comportamiento se observa con las fibras DSF y NZ-DSF y se puede verificar en la Tabla 3.

## 5. REQUERIMIENTOS DE ANCHO DE LÍNEA DEBIDO A LOS EFECTOS NO LINEALES

Para analizar el impacto de los efectos no lineales en el requerimiento de ancho de línea de la fuente óptica del sistema de transmisión se incrementó la potencia del láser del OLT a 10 dBm. Para cuantificar el impacto de los efectos no lineales en el sistema, se compararon las curvas con y sin no linealidades en la fibra óptica. Esto se realizó habilitando o deshabilitando estos efectos en el simulador. De esta manera, la diferencia entre las dos curvas se deberá solo a los efectos no lineales de la fibra óptica en conjunto y no por algún efecto no lineal en particular.

En la Figura 5 se presentan las curvas de BER en función del ancho de línea del láser del OLT, utilizando fibras DSF y SSMF en escenarios con 3 y 5 longitudes de onda a 10 Gbps y potencia de transmisión de 10 dBm. Se presentan los resultados con y sin los efectos no lineales de la fibra.



**Figura 5. ber en función del ancho de línea a 10 Gbps en escenarios WDM-PON con 3 y 5 longitudes de onda ( $\lambda$ ), sobre 20 km de fibras DSF y SSMF. Potencia de transmisión 10 dBm.**

Partiendo de los resultados presentados en la Figura 5 se obtiene el máximo ancho de línea permitido en el láser de la fuente óptica para obtener un BER de  $1 \times 10^{-12}$  cuando se activan los efectos no lineales de la fibra. Estos valores se presentan en la Tabla 4.

Cabe aclarar que en la Figura 5 y por consiguiente en la Tabla 4, no se incluyeron los resultados con la fibra NZ-DSF para facilitar la visualización de los resultados. Sin embargo, el comportamiento con este tipo de fibra es similar al presentado con la fibra SSMF. Tampoco se incluyeron los resultados con una portadora óptica ya que

a 10 dBm se obtuvieron los mismos resultados que a 0 dBm y estos resultados fueron presentados en la sesión anterior.

**Tabla 4. Máximo ancho de línea permitido para obtener un  $BER = 1 \times 10^{-12}$  a 10 Gbps en WDM-PON con potencia óptica de 10 dBm.**

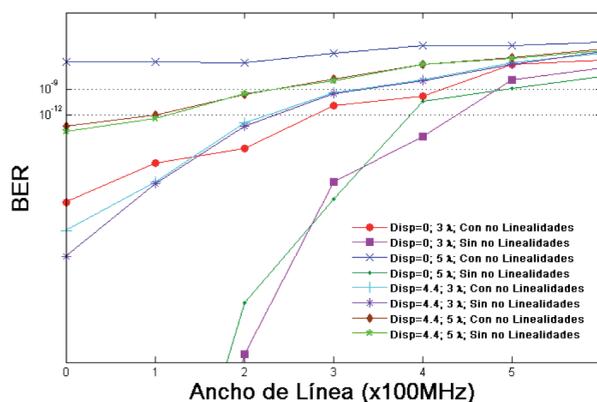
Número de Longitudes de Onda	Tipo de Fibra	Ancho de Línea sin No Linealidades (MHz)	Ancho de Línea con No Linealidades (MHz)
3	DSF	210	140
	SSMF	96	91.6
5	DSF	200	-
	SSMF	91.8	63

Analizando los resultados de la Tabla 4 solo desde el punto de vista de las no linealidades se identifican dos comportamientos: en primer lugar se observa que las no linealidades afectan en mayor medida a la información cuando se utiliza una fibra DSF. Este comportamiento se evidencia fácilmente observando el caso del escenario con 5 longitudes de onda y fibra DSF, en este caso, cuando no actúan los efectos no lineales se puede transmitir con un ancho de hasta 200 MHz, pero al considerar las no linealidades en este mismo escenario no se puede obtener un  $BER = 1 \times 10^{-12}$  ni con un láser de ancho de línea de 0 Hz. Mientras que con la fibra SSMF la penalidad es apenas de 28.8 MHz.

En segundo lugar se observa un aumento en la penalidad del ancho de línea cuando se incrementa el número de longitudes de onda. Esto se evidencia con el incremento en la penalidad del ancho de línea en el escenario con cinco longitudes de onda con respecto al escenario con tres longitudes de onda usando cualquiera de las dos fibras ópticas.

En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos a 20 Gbps con fibras DSF y NZ-DSF en escenarios con 3 y 5 longitudes de onda. Las curvas observadas en la Figura 6 permiten identificar los máximos valores de ancho de línea para obtener un  $BER = 1 \times 10^{-12}$  los cuales se resumen en la Tabla 5.

Los resultados obtenidos muestran los mismos comportamientos que a 10 Gbps en cuanto a la penalidad debida a los efectos no lineales. Sin embargo, se observa que al aumentar al doble la tasa de transmisión, se duplica el máximo ancho de línea permitido para garantizar un  $BER = 1 \times 10^{-12}$  comparado con el caso a 10 Gbps.



**Figura 6. BER en función del ancho de línea a 20 Gbps en escenarios WDM-PON con 3 y 5 Longitudes de onda ( $\lambda$ ), sobre 20 km de fibras DSF y SSMF. Potencia de transmisión 10 dBm.**

**Tabla 5. Máximo ancho de línea permitido para obtener un  $BER = 1 \times 10^{-12}$  a 20 Gbps en WDM-PON con potencia óptica de 10 dBm.**

Número de Longitudes de Onda	Tipo de Fibra	Ancho de Línea sin No Linealidades (MHz)	Ancho de Línea con No Linealidades (MHz)
3	DSF	438	278
	NZDSF	235	226
5	DSF	386	-
	NZDSF	114	98

Los resultados también muestran, que no fue posible recuperar la información en el escenario con cinco longitudes de onda y fibra DSF, esto debido que al incrementar la potencia se incrementan los efectos no lineales, especialmente cuando la dispersión es cercana a cero.

Finalmente, los resultados muestran que el formato de modulación DPSK permite mayores valores de ancho de línea en el láser del transmisor cuando se incrementa la velocidad de transmisión y se utilizan fibras ópticas DSF y NZ-DSF. Este comportamiento se refleja en la reducción del costo del transmisor. A nivel comercial el costo de un láser de cavidad externa con un ancho de línea de 50 kHz tiene un costo aproximado de 1.5 veces el valor de un láser DFB con un ancho de línea de 12.5 GHz (0.1 nm) y un costo aproximado de 2.0 veces el costo de un láser Fabry-Perot con un ancho de línea de 625 GHz (5 nm). En el despliegue de una red PON con N usuarios se requiere de N+1 láseres, tanto en el OLT como en los ONUs. Si debido al incremento en el ancho de línea de los láseres se logra un factor de reducción en el costo por láser igual a F, el factor de reducción en toda la red es de F.N. Para una red de 512 usuarios con un costo por láser

de USD 2.500 y un factor de ahorro de 1/1,5, el factor de ahorro en la red es  $512/1,5 = 341$ , que equivale a un ahorro de USD 852.500 en el despliegue de la red.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis del impacto de los efectos lineales y no lineales en el diseño de una red WDM-PON con formato de modulación DPSK en el canal descendente utilizado en los recientes esquemas con re-modulación de la portadora óptica en la ONU para transmitir la información del canal ascendente. El sistema se evaluó analizando la penalidad del ancho de línea de la fuente óptica utilizando fibras ópticas de diferentes coeficientes de dispersión y diferentes niveles de potencia óptica. Los resultados se enfocaron en presentar los máximos valores de ancho de línea permitidos para obtener un BER de  $1 \times 10^{-12}$  considerando los efectos lineales y no lineales de la fibra óptica en un escenario WDM-PON utilizando formato de modulación DPSK, velocidades de transmisión de 10 y 20 Gbps y fibras ópticas DSF, NZ-DSF y SSMF.

Con respecto al impacto de los efectos lineales en el diseño de sistemas WDM-PON a baja potencia, se concluye que es posible transmitir a 10 Gbps utilizando fuentes ópticas de ancho de línea en promedio de 200 MHz con fibras DSF y NZ-DSF en escenarios con 1, 3 o 5 longitudes de onda. Mientras que con fibra SSMF se puede transmitir con un ancho de línea alrededor de 100 MHz en los mismos escenarios. Cuando se transmite a 20 Gbps es posible utilizar láseres con ancho de línea entre 375 y 475 MHz utilizando fibra DSF y un ancho de línea entre 125 y 415 MHz con fibra NZ-DSF en escenarios con 1, 3 o 5 longitudes de onda. En el caso de la fibra SSMF solo fue posible recuperar la información en el escenario con una sola longitud de onda con un ancho de línea de alrededor de 50 MHz.

Por otra parte, cuando se consideraron los efectos no lineales se obtuvo que para garantizar un  $BER = 1 \times 10^{-12}$  en el escenario con 3 longitudes de onda y fibra DSF se requiere un ancho de línea de 140 MHz, mientras que en el mismo escenario, pero sin considerar las no linealidades, el ancho de línea requerido es de 210 MHz, esto indica una penalidad de 70 MHz por los efectos no lineales. Haciendo este mismo análisis en el escenario con 5 longitudes de onda la penalidad es superior a 200 MHz. En cambio, en el escenario con 3 longitudes de onda pero con fibra SSMF se requiere un ancho de línea de 91.6 MHz para garantizar el mismo BER y considerando las no linealidades, pero a diferencia de la fibra DSF en este caso la penalidad es de 5 MHz y en el escenario con 5

longitudes de onda la penalidad fue de 28.8 MHz que es mucho menor que la penalidad obtenida con la fibra DSF. En el caso de la transmisión a 20 Gbps se obtuvo un comportamiento similar. Estos resultados permiten concluir que los efectos no lineales impactan en mayor medida a los sistemas de transmisión que utilizan fibras ópticas con coeficientes de dispersión cercanos a cero y que la recomendación es usar fibras ópticas NZ-DSF para equilibrar el impacto tanto de los efectos lineales como los no lineales.

Finalmente, los resultados de este trabajo muestran que al incrementar la velocidad de transmisión aumenta el ancho de línea permitido en la fuente óptica cuando se utiliza el formato de modulación DPSK. Este comportamiento se mantiene independientemente del tipo de efecto de propagación que afecte el sistema de transmisión cuando se utilizan fibras ópticas DSF y NZ-DSF. Este comportamiento permite el uso de fuentes espectrales de mayor ancho de línea, lo cual se refleja en la reducción del costo del transmisor.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó bajo el proyecto “Red de comunicación multiservicio con soporte a redes inteligentes (smart-grid)” patrocinado por el Departamento de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) y la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (UPB). De igual manera se agradece a la UPB por su apoyo a uno de los autores en su pasantía de investigación en el grupo de investigación GIDATI.

## 8. REFERENCIAS

Agrawal, G. Nonlinear Fiber Optics. Elsevier, 2001. Ahsan, S.; Lee, M.; N., S.; Asif, S. Migration to the next generation optical access networks using hybrid wdm/tm-pon. Journal of Networks, 6, 2011. URL: <http://ojs.academypublisher.com/index.php/jnw/article/view/06011825>.

Álvarez, J.; Medina, B.; Serpa, C.; Guerrero, N. Compensación digital de la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticas basados en algoritmos cma y mmse. En Memorias del XVI Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial Ú Stsiva, 2011.

Belleville, M.; Van Hoof, C.; Ionesco, A.; Lawreins, R.; Pelka, J.; Sangiorgi, E.; Wolny, M. Semiconductor Technologies for Smart Cities. Technical Report CATRENE, Cluster for Application and Technology Research in Europe on NanoElectronics, 2014.

- Chenyang, H.; Wei, H. Simulation and comparison of advanced modulation formats for wavelength reuse in high-speed wdm-pon system. *Journal of Physics: Conference Series*, 276, 012059, 2011. URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/276/i=1/a=012059>.
- Chow, C.; Yeh, C. Using downstream dpsk and upstream wavelength-shifted ask for rayleigh backscattering mitigation in tdmpon to wdm-pon migration scheme. *Photonics Journal*, IEEE, 5, 7900407-7900407, 2013. doi:10.1109/JPHOT.2013.2247588.
- Emsia, A.; Le, T.; Von Lerber, T.; Briggmann, D.; Kuppers, F. Wdm-pon upstream budget extension for 4x10 gbit/s dpsk directly modulated lasers. (pp. 34-35), 2012. doi:10.1109/IPCon.2012.6358475.
- Han, W.; Zhang, M.; Liu, M.; Chen, X. 10gbit/s full-duplex bidirectional rsoa-based wdm pon using machzehnder interferometer and forward error correction. *En Communications and Photonics Conference (ACP)*, 2012 Asia (pp. 1-3), 2012.
- Huawei Next-Generation PON Evolution. Technical Report Huawei Technologies Co, 2010.
- Hussain, A.; Xiangjun, X.; Hussain, A.; Latif, A.; Munir, A.; Khan, Y.; Idrees, M. A symmetric 10gbps x lambda colorless wdm-pon. *Journal of Computational Information Systems*, 9, 881-888, 2013.
- Hussain, A.; Yu, C.; Xin, X.; Yuan, Q.; Liu, B.; Hussain, A.; Latif, A.; Munir, A.; Khan, Y.; Afridi, I. A novel duplex wdm-pon with dpsk modulated downstream and re-modulation of the downlink signal for ook upstream. *Optoelectronics Letters*, 8, 134-137, 2012. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11801-012-1105-4>.
- Kaminow, I.; Li, T.; Willner, A. *Optical Fiber Telecommunications VIB: Systems and Networks*. Elsevier, 2008.
- Kumar, A.; Janyani, V. Analysis of Ook Upstream Signal Remodulation for Different Data Rates in WDM-PON Network. *International Journal of Signal Processing Systems*, 3, 134-138, 2015.
- Latal, J.; Vitasek, J.; Koudelka, P.; Siska, P.; Poboril, R.; Hajek, L.; Vanderka, A.; Vasinek, V. Simulation of modulation formats for optical access network based on wdm-pon. *En Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2014 16th International Conference on (pp. 1-7), 2014. doi:10.1109/ICTON.2014.6876473.
- Lin, R. Next generation pon in emerging networks. *En Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on (pp. 1-3), 2008. doi:10.1109/OFC.2008.4528701.
- Ling, C.; Dahlfors, S.; Hood, D. Evolution of pon: 10gpon and wdm-pon. *En Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP)*, 2010 Asia (pp. 709-711), 2010. doi:10.1109/ACP.2010.5682701.
- Nai, W.; Dong, D. A cost Effective Multi-Services WDM-PON Employing DPSK FSK Orthogonally Modulated Downstream and Ook Remodulated Upstream. *En Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2011)*, IET International Communication Conference on (pp. 232-236), 2011. doi:10.1049/cp.2011.0881.
- Pellicer, S.; Santa, G.; Bleda, A.; Maestre, R.; Jara, A.; Gómez-Skarmeta, A. A global perspective of smart cities: A survey. *En Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*, 2013 Seventh International Conference on (pp. 439-444), 2013. doi:10.1109/IMIS.2013.79.
- Reis, J.; Drummond, M.; Teixeira, A.; Nogueira, R.; Monteiro, P.; Shinada, S.; Wada, N.; Belen, G. Experimental Demonstration of a Nonlinear Effects Crosstalk Minimization Algorithm. *En Optical Fiber Communication (OFC)*, Collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC) (pp. 1-3), 2010.
- Seimetz, M. *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- Wong, E. Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies. *Lightwave Technology, Journal*, 30, 597-608, 2012. doi:10.1109/JLT.2011.2177960.
- Zhao, J.; Chen, L.; Chan, C. A novel re-modulation scheme to achieve colorless high-speed wdm-pon with enhanced tolerance to chromatic dispersion and re-modulation misalignment. *En Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on (pp. 1-3), 2007. doi:10.1109/OFC.2007.4348855.
- Zhu, J.; Pachicke, S.; Lawin, M.; Mayne, S.; Wonfor, A.; Penty, R.; Cush, R.; Turner, R.; Firth, P.; Wale, M.; White, I.; Elbers, J. First Demonstration of a WDM-PON System Using Full C-band Tunable SFP+ Transceiver Modules [invited]. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, 7, A28-A36, 2015. doi:10.1364/JOCN.7.000A28.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó bajo el proyecto “Red de comunicación multiservicio con soporte a redes inteligentes (smart-grid)” patrocinado por el Departamento de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) y la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (UPB). De igual manera se agradece a la UPB por su apoyo a uno de los autores en su pasantía de investigación en el grupo de investigación Gidati.