

## MODELADO DE LOS FENÓMENOS NO LINEALES GENERADOS POR EL EFECTO ELECTRO-ÓPTICO KERR EN UNA TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA

### MODELING OF NON-LINEAR PHENOMENA GENERATED BY THE ELECTRO-OPTICAL KERR EFFECT IN A FIBER OPTIC TRANSMISSION

Est. Fabián Gómez López\*, Est. Luilly Alejandro García Ortiz\*  
MSc. Karla Cecilia Puerto López\*, Ph.D. Dinael Guevara Ibarra\*\*

Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería, GIDT.  
Av. Gran Colombia No. 12E-96, San José de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: (+57 7) 577 6655 y Fax: (+57 7) 575 3893.  
E-mail: {fabiangomez, luillyalejandrog, karlaceciliapl, dinaelgi}@ufps.edu.co

**Resumen:** En este artículo se presenta un estudio, simulación y evaluación de los fenómenos ópticos no lineales auto-modulación de fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM), presentes en una comunicación por fibra óptica, y generados por el efecto electro-óptico Keer. Para ello se realiza el modelado de los fenómenos no lineales en la herramienta computacional Matlab, para determinar las degradaciones producidas en la transmisión de información, operando a 10 Gbps, con multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y con potencias de entrada de 20 mW, 40 mW y 60 mW, para un enlace de fibra óptica de 10 Km, 30 Km y 50 Km. En los resultados se evidencio que la incidencia de estos fenómenos no lineales es directamente proporcional a la potencia óptica que adquiere la señal a la entrada del canal.

**Palabras clave:** Diafonía, modulación, multiplexación, relación señal a ruido.

**Abstract:** This paper describes a study, simulation and evaluation of nonlinear optical phenomena self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four-wave mixing (FWM), present in an optical fiber communication occurs, and generated by the electro-optical effect Keer. For this modeling of nonlinear phenomena is performed in Matlab computational tool to determine the impairments caused in the transmission of information, operating at 10 Gbps, with division multiplexing wavelength (WDM) and power inputs of 20 mW, 40 mW and 60 mW, for a fiber optic link 10 Km, 30 Km and 50 Km. in the results showed that the incidence of these nonlinear phenomena is directly proportional to the optical power acquires the signal the channel entrance.

**Keywords:** Crosstalk, modulation, multiplexing, signal to noise ratio.

## 1. INTRODUCCIÓN

La idea de asumir que las señales que se propagan por la fibra óptica se comportan linealmente, es una aproximación adecuada cuando se opera a niveles de potencia de unos pocos mW y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo, a velocidades superiores como 10 Gbps o potencias más altas, se generan en las señales

ciertos fenómenos que hacen que la fibra óptica se comporte no linealmente (Ramaswami, 2014, Rodríguez O. et al., 2012). El incremento del ancho de banda requerido por los sistemas de comunicaciones al utilizar redes pasivas con capacidad de Gigabit (*Gigabit-capable Passive Optical Network*, XG-PON) y redes de acceso (*Fiber to the Home*, FTTH), junto con técnicas de

multiplexación más eficientes, como la multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM), ocasionan que las potencias de las señales que se propagan por la fibra se incrementen de manera considerable (>10 mW) y que estos fenómenos no lineales empiecen a jugar un papel importante en el análisis de un sistema de comunicaciones óptico (Ramaswami, 2014).

Estos fenómenos no lineales se producen debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra óptica, con la potencia del campo eléctrico aplicado; conllevando a la aparición de fenómenos, como: la auto-modulación de fase (*Self-Phase Modulation*, SPM), la modulación de fase cruzada (*Cross-phase Modulation*, XPM) y la mezcla de cuatro ondas (*Four Wave Mixing*, FWM) (Fernandez, 2015). Estos fenómenos causan que la señal óptica se degrade, restringiendo el desempeño de la comunicación (López, 2011).

Debido a lo anterior, este documento está enfocado en realizar un análisis de estos fenómenos no lineales, utilizando simulaciones en la herramienta computacional Matlab, para una transmisión de información con potencia de entrada de 20 mW, 40 mW y 60 mW y un enlace de fibra óptica de 10 Km, 30 Km y 50 Km, considerando la recomendación IUT-T G.659 de la unión internacional de telecomunicaciones.

## 2. EFECTO ELECTRO- ÓPTICO KERR

A altas velocidades y potencias muy elevadas, se empiezan a generar fenómenos que hacen que la fibra óptica se comporte no linealmente, entre ellos se encuentra el efecto Kerr, en el cual, la dependencia no lineal del índice de refracción respecto de la intensidad de la onda incidente genera los fenómenos no lineales SPM, XPM y FWM (Vengoechea, 2013). El índice de refracción de la fibra óptica depende de la potencia de la señal transportada y esta dependencia se expresa mediante la siguiente ecuación (Cáceres, 2013):

$$n = n_0 + n_2 \frac{P_{in}}{A_{eff}} \quad (1)$$

Donde  $n_0$  es el índice de refracción lineal,  $n_2$  es el índice de refracción no lineal, un valor constante para la fibra de silicio de  $n_2 \cong 2,6 * 10^{-20} \frac{m^2}{W}$  y el cociente  $P_{in}$  sobre  $A_{eff}$  corresponde a la intensidad de la onda incidente (Cáceres, 2013).

### 2.1 Auto-modulación de fase (SPM):

El fenómeno SPM surge debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la potencia (Álvarez, 2007). Este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la potencia del pulso.

$$\phi_{NL} = \gamma L_{eff} * (P_1) \quad (2)$$

Donde  $\gamma$  define el coeficiente no lineal y  $L_{eff}$  es la longitud efectiva (Álvarez, 2007). De esta forma, las diferentes partes del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase, provocando que se modifiquen los efectos de la dispersión sobre el pulso.

### 2.2 Modulación de fase cruzada (XPM):

La XPM surge debido a que el índice de refracción para una onda depende no sólo de la potencia de esa onda sino también de la potencia de cualquier otra onda que se propague junto a ella (Álvarez, 2007).

$$\phi_{NL} = \gamma L_{eff} * ((P_1)^2 + 2 * (P_2)^2) \quad (3)$$

La degradación de la señal del sistema WDM debido a los fenómenos SPM y XPM, se hace evidente cuando el desfase de la señal en el receptor es superior a los límites establecidos en los diferentes tipos de modulaciones aplicadas a la señal en el emisor.

### 2.2 Mezcla de cuatro ondas (FWM):

La FWM se produce de forma general cuando tres portadoras de frecuencias distintas  $\omega_i$ ,  $\omega_j$  y  $\omega_k$ , con potencias  $P_i$ ,  $P_j$  y  $P_k$ , interactúan en el interior de la fibra para generar una cuarta onda. Esta cuarta onda se origina por la dependencia entre el índice de refracción de la fibra y la intensidad de la señal, relación que genera la aparición de nuevos pulsos de señal o “espúreos” con nuevas frecuencias o longitudes de onda, que obedecen a (Cáceres, 2013):

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (4)$$

Donde  $i, j \neq k$ , toman valores de 1, 2, 3...n, la generación de nuevos pulsos por efecto FWM, se deben considerar en sistemas WDM, puesto que pueden producir degradaciones en los canales de la transmisión, introduciendo ruido por diafonía, si esta cuarta frecuencia coincide en valor con alguna de las tres anteriores. La consideración de este

fenómeno es importante cuanto mayor sea la potencia de los canales del sistema WDM (Cáceres, 2013):

Para que la información pueda ser detectada en el receptor de manera eficiente, se debe cumplir con una tasa de error de bit (*Bit Error Rate*, BER) de  $1 \cdot 10^{-12}$ , y para esto la relación señal a ruido (*Optical Signal-To-Noise Ratio*, OSNR) debe ser mayor a 20 dB (Harboe, 2008).

La potencia óptica  $P_{ijk}$  del canal o espúreo generado por FWM en  $\eta_{ijk}$ , que se establece al final del enlace viene dado mediante la siguiente ecuación (Cáceres, 2013):

$$PFWM = \left( \frac{d_{ijk}}{3} \gamma L_{eff} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (5)$$

Dónde:

$d_{ijk} = 3$  si  $i = j$  determinado como caso degenerado.

$d_{ijk} = 6$  si  $i \neq j \neq k$  determinado como caso no degenerado.

$\eta =$  es la eficiencia de generación de FWM, tiende a su valor máximo cuando  $\eta = 1$ .

### 3. METODOLOGÍA

Para realizar el análisis y evaluación de los fenómenos no lineales, se realizó simulaciones en el software Matlab. Para ello se creó una interfaz gráfica de usuario, la cual modela el canal de fibra óptica, junto con los fenómenos no lineales SPM, XPM y FWM, esta interfaz gráfica permite ingresar los parámetros relacionados con el sistema de comunicación óptico (Ver Fig. 1).



Fig. 1. Interfaz gráfica. Fuente: Matlab.

La interfaz gráfica posibilita el ingreso de tres señales a la entrada que viajan por el canal y que producen los fenómenos no lineales. Los

parámetros de la comunicación son iguales para las tres señales; las tres señales viajan a diferentes longitudes de onda. La señal que sufre la degradación producida por SPM, XPM y FWM, es denominada señal transmisora y se encuentra a la longitud de onda central, las dos señales contiguas con longitud de onda menor y longitud de onda mayor, son denominadas señales de bombeo y tienen un espaciamiento en frecuencia de 100 GHz de acuerdo a los sistemas de multiplexación por división de longitud de onda WDM.

Los parámetros ingresados para la señal transmisora y las señales de bombeo, son:

- Velocidad de transmisión (R)
- Potencia de la señal (Pint)
- Atenuación (a)
- Longitud del enlace de fibra óptica (L)
- Índice de no linealidad ( $n_2$ )
- Área efectiva de la fibra (Aeff)
- Dispersion cromática de la fibra (D)
- Pendiente de dispersión (S)
- Longitud de onda de dispersión cero ( $\lambda_0$ )

Además de esto dispone de dos tipos de modulación:

- Modulación de amplitud (OO-K)
- Modulación de fase diferencia (DPSK)

La interfaz gráfica permite obtener la OSNR que adquiere la señal a la salida de la comunicación; junto con la observación de la señal transmisora tanto a la entrada como a la salida del canal de fibra óptica, por medio de diferentes representaciones gráficas, como:

- Potencia versus tiempo
- Diagrama de constelación
- Diagrama de ojo
- BER versus OSNR
- Pint versus OSNR
- Pint versus PFWM

### 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el análisis de las degradaciones producidas por SPM, XPM y FWM se consideró:

- Un sistema WDM con tres canales
- Un tipo de modulación DPSK
- Una velocidad de transmisión de 10 Gbps
- Un espaciado entre canales de 100 GHz

- Una longitud de onda de operación de 1550 nm
- Potencias de entrada de 20 mW, 40 mW y 60 mW
- Tres distancias de enlace de fibra óptica de 10 Km, 30 Km y 50 Km
- Un coeficiente de atenuación  $\alpha$  de 0.21 dB/Km
- Una fibra monomodo estándar

## 5. RESULTADOS

En la Fig. 2 se representa el comportamiento que adquiere la potencia con respecto al tiempo de símbolos de la señal. Analizando esta figura se evidencia la restricción que impone la constante de atenuación  $\alpha$  en la potencia de la señal a medida que se propaga por el canal de fibra óptica.

La señal de color azul es la señal transmisora a la entrada del canal, la señal de color negro es a una distancia de 10 Km, la señal de color café es a 30 Km y la señal de color verde es a 50 Km.

Para una potencia de 20 mW el ruido por FWM es insignificante, debido a que la OSNR es de 35.29 dB y para que se produzca error en la comunicación este valor debe ser menor o igual a 20 dB.

Caso contrario sucede en la Fig. 2c, la señal adquiere una potencia de entrada de 60 mW y una OSNR de 20.98 dB; estos valores hacen que la señal se degrade en gran medida. En este punto el fenómeno FWM se vuelve un grave inconveniente en la comunicación cuando se realiza multiplexación por división de longitud de onda WDM, porque con esta OSNR la señal es difícilmente recuperada en el receptor y por ende restringe el desempeño de la comunicación.

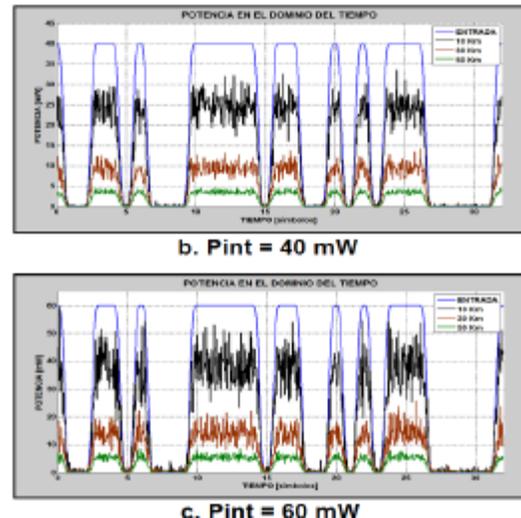
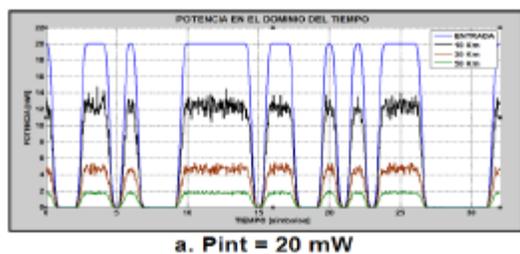


Fig. 2. Potencia versus tiempo.

En la Fig. 3 se representan los diagramas de constelación con modulación DPSK. Se destaca el ruido generado por el fenómeno no lineal FWM y los desfases producidos por la suma de los fenómenos SPM y XPM.

El desfase máximo que adquiere la señal (a 50 Km), según las potencias indicadas, son: 2.7240 rad para 20 mW, 5.4481 rad para 40 mW y 8.1722 rad para 60 mW. A una potencia de entrada mayor a 40 mW la señal adquiere el máximo desfase. Este desfase hace que la señal se degrade, porque se sobrepasan los límites de desfases en la modulación DPSK. Para que esto suceda el desfase debe ser mayor a 3.1415 rad y menor a 4.7122 rad (Tomasi, 2003).

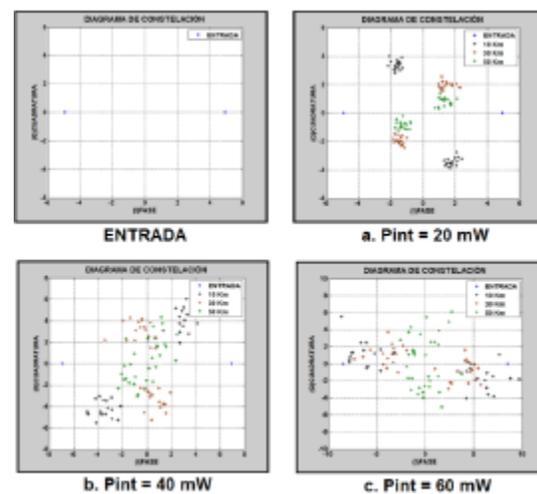


Fig. 3. Diagrama de constelación con modulación DPSK. Fuente: Matlab.

En la Fig. 4 se grafica el diagrama de ojo de la señal transmisora a una distancia de 10 Km. Esta señal demuestra el ruido generado por FWM. La amplitud del ojo se reduce a medida que se incrementa la potencia de entrada, según la OSNR. Para una potencia de 60 mW la OSNR es de 20.98 dB, siendo este el peor de los casos en la comunicación.

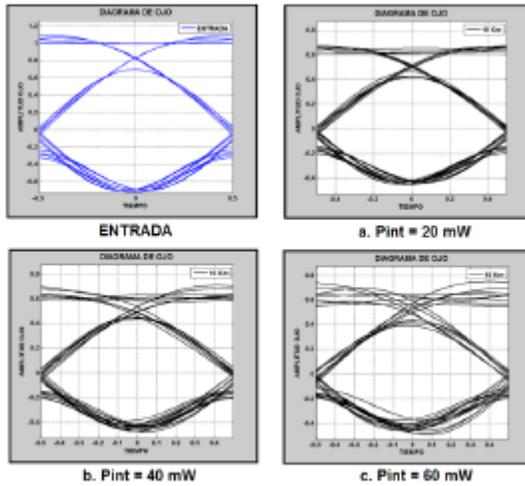


Fig. 4. Diagrama de ojo a 10 Km con modulación DPSK. Fuente: Matlab.

En la Fig. 5 se representa la dependencia que tiene la potencia de entrada en la OSNR. Analizando esta figura, se concluye, que la incidencia de los fenómenos no lineales, es dependiente de la potencia óptica que tiene la señal a la entrada del canal y esto se determina analizando la curva que adquiere la OSNR.

A medida que la potencia se incrementa disminuye la OSNR y por ende aumenta la incidencia de los fenómenos no lineales.

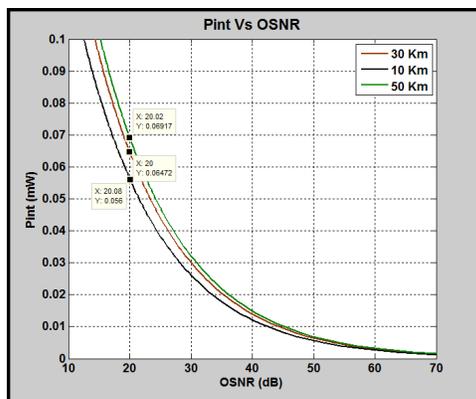


Fig. 5. Potencia de entrada versus relación señal a ruido. Fuente: Matlab.

## 6. CONCLUSIONES

La incidencia de los fenómenos no lineales SPM, XPM y FWM, en una comunicación por fibra óptica, es directamente proporcional a la potencia óptica que adquiere la señal a la entrada del canal.

El desfase producido por SPM y XPM, causa degradación considerable en el sistema de comunicación óptico. Analizando el comportamiento de la señal óptica en la comunicación, se comprobó que el desfase por SPM y XPM, es directamente proporcional a la distancia del enlace.

La incidencia del fenómeno FWM es inversamente proporcional a la OSNR de la comunicación. El ruido producido por FWM no degrada la señal a una potencia mínima de 20 mW, porque se obtiene una OSNR de 35.29 dB. Pero una potencia máxima de 60 mW se adquiere una OSNR de 20.98 dB, aproximándose a 0.98 dB del mínimo valor permitido; degradando la señal y restringiendo el desempeño de la comunicación.

## 7. RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Francisco de Paula Santander. En especial al Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones (GIDT), quienes apoyaron la realización de este proyecto.

## REFERENCIAS

- Ramaswami, R. (2014). Optical Networks, Academic Press, Tercera edición, San Diego California.
- Rodríguez Oscar Oswaldo, Pineda Pinto Ronald Fernando, Cárdenas Pedro Fabián. (2012). herramientas EJS 3D/MATLAB para el control del sistema no lineal aplicado al péndulo invertido sobre carro deslizante. Revista colombiana de tecnologías de Avanzada. 1 (19). Pág. 28 – 34
- Fernandez, P. G. (2015). Una red todo óptica para los servicios del futuro, Telos comunicación e innovación, Bogotá, Colombia.
- López, J. G. (2011). “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de no linealidad”. Revista Facultad de Ingeniería, Vol. 20, No 31.
- Vengoechea, M. J. (2013). Impacto del fenómeno de no linealidad FWM en un enlace Óptico WDM teniendo en cuenta Fibra Dispersiva,

- Área Telecomunicaciones, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
- Cáceres, J. A. (2013). “Modelamiento de un algoritmo para la asignación de longitudes de onda en un multiplexor DWDM minimizando el proceso de mezclado de la cuarta onda FWM (Four wave mixing)”. *Revista Redes de Ingeniería*, Vol. 4, No 1.
- Álvarez, J. A. (2007). *Análisis de Atenuación, Dispersión y Auto-modulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s*, Centro de investigaciones en óptica, León Guanajuato, México.
- Harboe, P. B. (2008). “Analysis of FWM Penalties in DWDM Systems”. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, No 12.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Education, Cuarta edición, Phoenix.