

Estudio y Simulación de los Efectos No Lineales Modulación Cruzada de Fase (XPM) y Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) en una Fibra Óptica Monomodo

Andrea E. Puerres¹ Diana E. Salazar¹ María Soledad Jiménez M.Sc²

¹ Escuela Politécnica Nacional (EPN)
andre.stef.puerres@gmail.com dianis_eli18@hotmail.com

² Escuela Politécnica Nacional (EPN)
maria.jimenez@epn.edu.ec

Resumen – En este artículo se realiza el estudio y simulación de los efectos no lineales Modulación cruzada de fase (XPM) y Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) en una fibra óptica monomodo de dióxido de silicio (SiO₂) y de esta manera comprender su origen y manifestación en una fibra óptica produciendo degradación en la transmisión. Se realiza una simulación en el programa computacional OptiSystem en el que se modifican parámetros de la fibra óptica con el fin de determinar el grado de interferencia en el sistema de transmisión.

Términos de Indexación – Mezcla de Cuatro Ondas, Modulación cruzada de Fase, Efectos no lineales, Sistemas WDM, Dispersión cromática.

I. INTRODUCTION

En la actualidad los sistemas de comunicaciones por fibra óptica son preferidos sobre otros medios de transmisión, debido a la capacidad que poseen las fibras ópticas para transportar grandes cantidades de información en trayectorias extensas sin acudir a repetidores y las altas tasas de transmisión que ofrecen.

Los efectos no lineales se pueden presentar cuando uno o más campos ópticos con varias longitudes de onda se propagan por la misma fibra óptica, con valores elevados de potencia y velocidad de transmisión. En este artículo se realiza el estudio de dos efectos no lineales XPM (*Cross Phase Modulation*) y FWM (*Four Wave Mixing*).

En XPM la modulación de intensidad de uno de los canales provoca una modulación de fase de los otros canales que se propagan por el mismo medio, ocasionando que el pulso óptico se ensanche.

Documento recibido el 6 de Abril del 2016. Este proyecto se realizó en la Escuela Politécnica Nacional (EPN), en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

A. E. Puerres participó en el proyecto por la Escuela Politécnica Nacional (email: andre.stef.puerres@gmail.com)

En el caso de FWM cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes se propagan en una misma fibra, pueden provocar una mezcla entre ellas y generar nuevas componentes de frecuencia en la señal óptica [9] [13].

II. ESTUDIO DEL EFECTO NO LINEAL MODULACIÓN CRUZADA DE FASE (XPM)

El efecto no lineal XPM se origina de la dependencia de la potencia con el índice de refracción no lineal de la fibra. Este fenómeno involucra dos o más canales ópticos propagándose simultáneamente con diferentes longitudes de onda en la fibra óptica. El efecto XPM produce el ensanchamiento del espectro del canal más débil y oscilaciones en la amplitud [12].

Representación matemática de XPM [2]

En un nivel fundamental, el origen de la respuesta no lineal se relaciona con el movimiento armónico junto a la influencia de un campo aplicado. Como resultado, la polarización total 1P es el producto de ϵ_0 la permisividad en el vacío, $\chi^{(j)}$ $j = (1, 2, \dots)$ el orden de susceptibilidad y E el campo eléctrico.

$$P = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} \cdot EE + \chi^{(3)} \cdot EEE + \dots), \quad (1)$$

La susceptibilidad de primer orden $\chi^{(1)}$ representa la contribución dominante de P , sus efectos se manifiestan a través el índice de refracción n y el coeficiente de atenuación α . El segundo orden de susceptibilidad $\chi^{(2)}$ es responsable de los efectos no lineales como generación de segundo armónico y *Sum-Frequency Generation*; sin embargo es distinta de cero

D. E. Salazar participó en el proyecto por la Escuela Politécnica Nacional (email: dianis_eli18@hotmail.com)

M. S. Jiménez Profesora a tiempo completo de la Escuela Politécnica Nacional en el Departamento de Electrónica y Redes de la Información (email: maria.jimenez@epn.edu.ec).

¹ P: Polarización total P (r,t)

únicamente para los medios que carecen de una simetría inversa a nivel molecular. Como el silicio es una molécula simétrica se descarta este término. En cuanto al tercer orden susceptibilidad $\chi^{(3)}$, es responsable de los fenómenos de generación del tercer armónico, mezcla de cuatro ondas y de la refracción no lineal.

El cambio de amplitud depende de la ecuación de onda, con la polarización lineal P_L y la polarización no lineal P_{NL} dada en la ecuación (2) [1].

$$P(r, t) = P_L(r, t) + P_{NL}(r, t) \quad (2)$$

De esta ecuación el componente no lineal P_{NL} se obtiene de forma simplificada como se expresa en la ecuación (3) [1]:

$$P_{NL}(r, t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} : E(r, t)E(r, t)E(r, t) \quad (3)$$

Para observar el origen de XPM, desarrollando el producto en la ecuación (3), la polarización no lineal P_{NL} se expresa de la siguiente forma [2]:

$$P_{NL}(r, t) = \frac{1}{2} \chi^{(3)} \begin{bmatrix} P_{NL}(w_1) \exp(-iw_1 t) \\ + P_{NL}(w_2) \exp(-iw_2 t) \\ + P_{NL}(2w_1 - w_2) \\ \exp[-i(2w_1 - w_2)t] \\ + P_{NL}(2w_2 - w_1) \\ \exp[-i(2w_2 - w_1)t] \end{bmatrix} \quad (4)$$

Se observa que se generan nuevas frecuencias ($2w_1 - w_2$), ($2w_2 - w_1$), estos términos resultan del efecto no lineal FWM, en este caso se descartan estos términos asumiendo que no existe coincidencia de fase.

$$P_{NL}(w_1) = X_{eff} (|E_1|^2 + 2|E_2|^2) \quad (5)$$

$$P_{NL}(w_2) = X_{eff} (|E_2|^2 + 2|E_1|^2) \quad (6)$$

Se producen los términos de polarización no lineal en función del campo eléctrico E_1 y el campo eléctrico E_2 en el cual $X_{eff} = (3 \varepsilon_0 / 4) \chi^{(3)}$ actúa como una constante no lineal. Estos términos contribuyen al índice de refracción no lineal [2].

$$P_{NL}(w_j) = \varepsilon_0 \varepsilon_j E_j \quad (7)$$

El índice de refracción visto en un campo óptico en el interior de la fibra, no solo depende de la intensidad de dicho campo sino también de otros campos de propagación. A medida que el campo óptico se propaga dentro de la fibra, adquiere un cambio de fase no lineal dependiente de la intensidad en dicho campo en el que $j_1=1, j_2=2$. La ecuación (8) indica la relación entre el cambio inducido de fase y el índice de refracción [2]:

$$\Phi_j^{NL}(z) = (w_j / c) \Delta n_j z \quad (8)$$

$$\Phi_j^{NL}(z) = n_2 (w_j / c) \left[|E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2 \right] z \quad (9)$$

En la ecuación (9) el primer término es responsable del efecto no lineal SPM (*Self Phase-Modulation*), el segundo resulta de la modulación de fase de una onda propagándose y es responsable del efecto XPM (*Cross-Phase Modulation*), el factor 2 muestra que es el doble de efectivo que SPM con la misma intensidad [12].

El efecto no lineal XPM, altera parámetros que participan en una transmisión sobre fibra óptica monomodo en sistemas WDM, entre éstos se tiene: ensanchamientos de los pulsos, atenuación, cambio en el espectro, interferencia (ISI).

De acuerdo a la ecuación (9) se tiene que para dos pulsos propagándose en una fibra óptica, el cambio de fase provocado por el efecto no lineal XPM puede medirse con la siguiente ecuación [12][13]:

$$\varphi_n^1 = \gamma L_{eff} (P_1 + 2P_2) \quad (10)$$

El cálculo del cambio de fase se basa en la generalización de la ecuación (11), la cual indica el cambio de fase para n canales en un sistema WDM, teniendo [13]:

$$\varphi_n^i = \gamma L_{eff} (P_i + 2 \sum_{n \neq i}^n P_n) \quad (11)$$

Donde i representa el canal a verificar su cambio de fase, que debe cumplir la condición $n \neq i$.

B. Cálculo de la contribución para el efecto no lineal XPM

A partir de la ecuación (11), se puede obtener el cambio de fase de cada canal para un número n de canales, este proyecto fue desarrollado para n=3; en cuyo caso reemplazando en la ecuación (11) se obtiene tres ecuaciones [13]:

$$\varphi_3^1 = \gamma L_{eff} (P_1 + 2P_2 + 2P_3) \quad (12)$$

$$\varphi_3^2 = \gamma L_{eff} (P_2 + 2P_1 + 2P_3) \quad (13)$$

$$\varphi_3^3 = \gamma L_{eff} (P_3 + 2P_2 + 2P_1) \quad (14)$$

El resultado son tres ecuaciones, cada ecuación representa el cambio de fase que experimentará cada pulso a causa del efecto XPM mientras se propaga por la fibra óptica. La Fig. 1 indica la forma del pulso con el desfase indicado, la figura muestra las formas básicas de desfase, pero para valores intermedios se deberá realizar una interpolación entre los resultados.

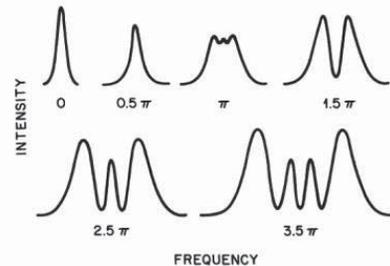


Figura 1. Forma del pulso con varios desfases [2]

Para tener una mejor comprensión del efecto XPM se debe trabajar en el rango donde es observable. La Fig. 2 representa la máxima potencia que se debe utilizar por cada canal, respecto al número total de canales en un sistema WDM.

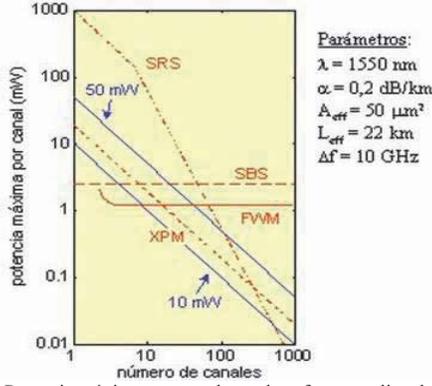


Figura 2. Potencia máxima por canal para los efectos no lineales

Para fines de estudio y análisis del efecto se trabajarán entre 8mW y 50mW de potencia por cada canal, para aprovechar la presencia del efecto XPM, con los diferentes tipos de fibra óptica monomodo con distintos parámetros de área efectiva y dispersión cromática.

III. ESTUDIO DEL EFECTO NO LINEAL MEZCLA DE CUATRO ONDAS (FWM)

El efecto no lineal mezcla de cuatro longitudes de onda se presenta de manera efectiva sólo si el desfase entre señales casi desaparece, para esto se requiere que coincidan las frecuencias, así como los vectores de onda. Este último requisito se conoce a menudo como coincidencia de fase.

La polarización inducida en un campo óptico no es lineal, éste contiene términos no lineales cuya magnitud se rige por las susceptibilidades no lineales. La mezcla de cuatro longitudes de onda es un efecto no lineal de tercer orden y se describe por la susceptibilidad de tercer orden $\chi^{(3)}$

A. Representación matemática de FWM [2] [8]

El efecto FWM se puede explicar en términos de la relación no lineal entre P y ϵ , siendo P la polarización y ϵ la susceptibilidad, ambas producen una refracción no lineal. En un sistema WDM, en el que el campo eléctrico se escribe de la siguiente manera [11]:

$$E(r,t) = \sum_{i=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) \quad (15)$$

La polarización no lineal se expresa en relación a los siguientes términos: E es el campo eléctrico y $\chi^{(3)}$ la susceptibilidad. Considerando la posibilidad de tres ondas ópticas que oscilan a frecuencias $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ polarizadas linealmente a lo largo del mismo eje x se tiene [3].

$$P_{NL}(r,t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \begin{pmatrix} E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) \\ E_j \cos(\omega_j t - \beta_j z) \\ E_k \cos(\omega_k t - \beta_k z) \end{pmatrix} \quad (16)$$

Al desarrollar la ecuación (15) se generan una gran cantidad de términos que implican el producto de tres campos eléctricos. Los términos de la forma $\omega_i + \omega_j - \omega_k, i, j \neq k$ con los que es

posible satisfacer aproximadamente la coincidencia de fase son tomados en consideración.

Se introduce el parámetro d_{ijk} que es el factor de degeneración, depende de los valores i, j; toma un valor de 3 si son iguales y 6 si son diferentes. Con estas consideraciones la polarización no lineal para w_{ijk} se expresa de la siguiente manera [3]:

$$P_{ijk}(z,t) = \frac{3\epsilon_0 \chi^{(3)}}{4} d_{ijk} E_i E_j E_k^* \cos\left[(\omega_i + \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z\right] \quad (17)$$

Si se asume que las señales se propagan en una onda plana con un área efectiva A_{eff} , y que la ecuación (16) se presenta en términos del índice refracción no lineal n_2 , además añadiendo los efectos de atenuación y dispersión cromática presentes en un sistema real, se tiene [4]:

$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \left(\frac{\omega_{ijk} n_2 d_{ijk} L_{eff}}{3c A_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \quad (18)$$

Donde P_i, P_j, P_k son las potencias de entrada. Por efectos de atenuación de la fibra óptica se coloca L_{eff} y se añade $e^{-\alpha L}$, por efectos de dispersión cromática se introduce el parámetro η_{ijk} que representa la eficiencia de FWM con las frecuencias $\omega_i, \omega_j, \omega_k$. La eficiencia del efecto no lineal FWM depende de la dispersión cromática de la fibra y del espaciamiento de los canales. Si la dispersión varía con la longitud de onda, las señales de entrada y las ondas generadas FWM tendrán diferentes velocidades de grupo, esto destruye la coincidencia de fase de las ondas que están interactuando y disminuye la eficiencia de la potencia que es transferida a las frecuencias generadas cercanas [3]. La ecuación de la eficiencia FWM es la siguiente [11]:

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \quad (19)$$

Donde $\Delta\beta$ es la diferencia entre las constantes de propagación. Que puede ser calculado de la siguiente manera [10]:

$$\Delta\beta = \left\{ \left[\left(\frac{2\pi\lambda^2}{c} \right) (\Delta f_{ik} \Delta f_{jk})^* \right] \left[D_c + \left(\lambda^2 / 2c \right) (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \left(dD_c / d\lambda \right) \right] \right\} \quad (20)$$

Donde D_c es la dispersión cromática y $dD_c/d\lambda$ es la derivada de la dispersión cromática con respecto a la longitud de onda.

B. Técnica de coincidencia de fase [2]

La ganancia paramétrica es responsable de los picos del efecto no lineal FWM cuando se produce la falta de coincidencia de fase $\kappa = 0$, donde κ es dada en (21) [2].

$$\kappa = \Delta k + \gamma(P_1 + P_2) \quad (21)$$

Efecto FWM con coincidencia de fase aproximada

La cantidad de desfase tolerable en el vector de onda depende del tiempo que la longitud de la fibra óptica es comparable con la longitud de coherencia L_{coh} . Se supone que la contribución Δk_M es el término dominante en la ecuación (22), la longitud

de coherencia se puede relacionar con los desplazamientos de frecuencia Ω_s , usando las ecuaciones (22) y (23) [12]:

$$L_{coh} = \frac{2\pi}{|\Delta k_M|} = \frac{2\pi}{|\beta_2|\Omega_s^2} \quad (22)$$

La longitud no lineal L_{NL} es aquella que al ser igual o menor que la longitud de la fibra óptica indica que los efectos no lineales deben ser tomados en consideración en el análisis [2].

$$L_{NL} = \frac{\lambda A_{eff}}{2\pi n_2 P_0} \quad (23)$$

En (23) P_0 es potencia óptica del canal WDM, A_{eff} es el área efectiva de la fibra óptica monomodo y n_2 es el índice de refracción no lineal.

C. Impacto del efecto FWM sobre un sistema WDM [3]

La interacción de los canales dentro de la fibra óptica monomodo genera canales adicionales parásitos que pueden disminuir la potencia de los canales originales, alterando la calidad de la información transmitida. El aumento del número de canales de transmisión N es directamente proporcional en el número de productos de mezcla FWM y se rigen por (24) [11]:

$$M = N(N-1)^2 \quad (24)$$

En el que N es el número de canales de entrada y M es el número de productos generados FWM. Hay que tomar en cuenta que los productos generados pueden sobreponerse entre sí

1) Con tres canales de entrada

Para que se produzcan nuevas frecuencias en la fibra óptica, se debe conocer que mientras se propagan juntas, las señales ópticas interactúan entre sí produciendo modulación de fase.

En la modulación de fase se generan dos bandas laterales a las frecuencias $w_3 \pm (w_2 - w_1)$. De igual manera este fenómeno se puede producir al interactuar w_1 con w_3 originando modulación de fase sobre w_2 , obteniendo las bandas laterales $w_2 \pm (w_3 - w_1)$, con lo cual ocasiona una coincidencia con las frecuencias previas $w_3 \pm (w_2 - w_1)$.

Con 3 canales de entrada, N=3, se obtiene 12 frecuencias generadas FWM. En la ecuación (25), se debe tomar en cuenta la restricción, ya que se elimina las combinaciones tal que $i=k$ y $j=k$, quedando en este caso 12 nuevas frecuencias generadas FWM [2].

$$w_{ijk} = w_i + w_j - w_k, i, j \neq k \quad (25)$$

Tabla 1. Frecuencias generadas FWM

Frecuencia generada FWM		
w_{112}	w_{221}	w_{321}
w_{113}	w_{231}	w_{312}
w_{132}	w_{213}	w_{331}
w_{123}	w_{223}	w_{332}

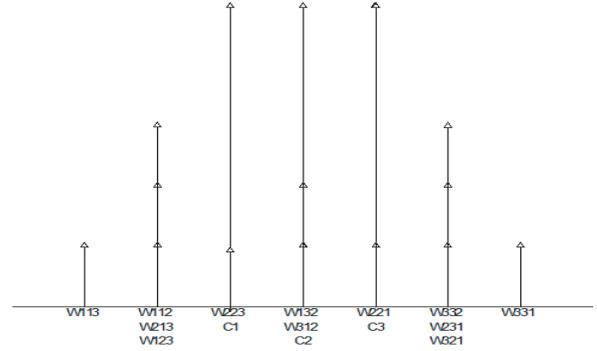


Figura 3. Patrón de frecuencias con tres canales WDM.

En la Tabla 1 se presentan los productos generados FWM en este caso.

En la Fig. 3 se observa el espectro de los canales WDM y las frecuencias generadas FWM.

Método para determinar el patrón de canales generados

El siguiente método, según la recomendación ITU G.694,1 determina la ubicación eficiente de los canales WDM con espaciado desigual.

Para seleccionar de manera eficiente la ubicación de los canales WDM, cada canal con espaciado desigual se debe elegir de tal manera que las nuevas potencias ópticas generadas por FWM no caigan sobre ningún canal óptico.

Para cumplir esto, la variación de frecuencias entre parejas de canales $\Delta\Omega$ debe ser diferente de cualquier otra pareja de canales. Esto se debe a que las frecuencias de los canales WDM w_i, w_j, w_k y la potencia óptica resultante de frecuencia w_{ijk} están relacionadas en la ecuación (25).

En la Fig. 4 se observa el resultado del espaciado desigual, donde en lugar de aglomerarse en el centro las frecuencias generadas FWM, se distribuyen a lo largo del ancho de banda del sistema WDM. Si se cumple esto las frecuencias generadas se pueden eliminar con filtros.

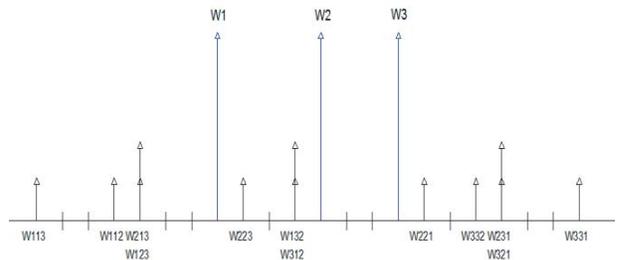


Figura 4. Patrón de frecuencias FWM para tres canales con espaciado desigual

IV. SIMULADOR UTILIZADO

Optiwave ha desarrollado varias herramientas de simulación, entre éstas se encuentra Optisystem. Este software solventa las necesidades de los diseñadores de sistemas ópticos y de componentes. Existen alrededor de 300 componentes disponibles en su biblioteca, combinado con una interfaz de usuario gráfica.

Para acceder a la versión demo se debe llenar un simple cuestionario con datos básicos y un correo electrónico válido empresarial. Una vez registrado, se recibe un correo con un código para acceder a la página de LOGIN.

Se ha analizado varios parámetros (Interfaz gráfica, efectos no lineales, nivel de propagación de la señal, sistemas WDM, entre otros) y se optó por el simulador Optisystem en la versión demo, debido a que posee un software flexible y de fácil manipulación en comparación con los otros simuladores, la descarga, búsqueda y obtención del programa versión demo es sencilla.

A. OPTISYSTEM

Es un programa con interfaz gráfica similar a Simulink en Matlab, con una interfaz gráfica de usuario completa (GUI), controla el diseño óptico de los componentes y lista de conexiones, modelos de componentes, y gráficos de presentación. Permite realizar mezclas de ondas, observar efectos no lineales como modulación cruzada de fase y mezcla de cuatro longitudes de onda entre otros.

Permite modelar los componentes mediante el ingreso de valores, los cuales se pueden obtener de datasheet de fábrica de los elementos, en la figura 5 se muestra el cuadro de valores del elemento fibra óptica.

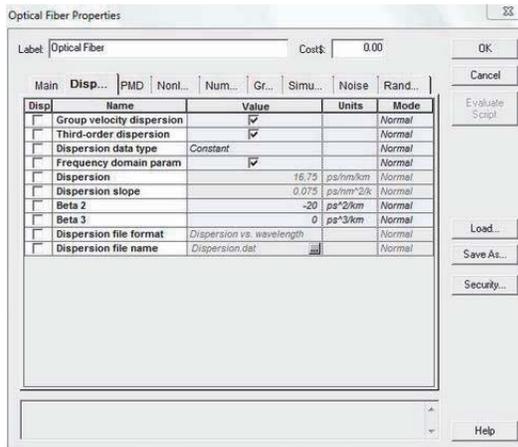


Figura 5. Propiedades del elemento Fibra Óptica

En la Fig. 6 se observa el diseño del enlace óptico con el que se realizó este estudio. Se observa además de los valores de cada elemento (fibra óptica SSMF) como ejemplo: Generador de pulsos, Mux, diferentes tipos de fibra óptica, visualizadores.

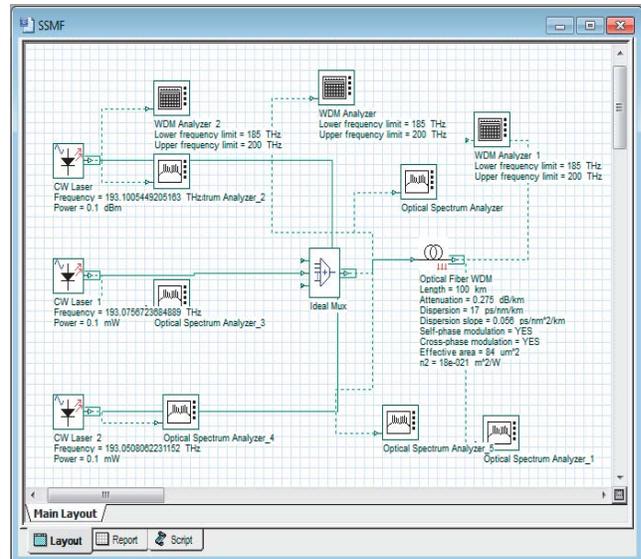


Figura 6. Interfaz gráfica del simulador OPTISYSTEM

V. SIMULACIÓN DEL EFECTO MODULACIÓN CRUZADA DE FASE

En esta sección se verificará el resultado de las simulaciones correspondientes al efecto no lineal Modulación Cruzada de Fase (XPM). Se presenta el estudio del efecto no lineal XPM en las fibras SSMF (*Standard Single Mode Fiber*), DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) y NZ-DSF (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber*), con variantes de longitud, potencia y distintos espaciamentos entre pulsos.

Tabla 2. Parámetros de las fibras SSMF, DSF y NZ-DSF [5] [6] [7]

Parámetros	Fibra SSMF	Fibra DSF	Fibra NZDSF
Atenuación	0.275dB/km	0.35 dB/km	0.2 dB/km
Dispersión Cromática	17 ps/nm-km	3.5 ps/nm-km	3.67 ps/nm-km
Pendiente Dispersión Cromática	0.056 ps/nm²/km	0.085 ps/nm²/km	0.105 ps/nm²/km
Área Efectiva	86.6 μm²	50 μm²	72.36 μm²
n_2	18x10-21 m²/W	30 e-021 m²/W	22.6 x 10 ⁻²¹ m²/W

Los pulsos están en tercera ventana (1550nm) de acuerdo a la distribución de canales de la norma G.692. La Fig. 2 indica el esquema a seguir para realizar una comparación de datos de acuerdo a los resultados obtenidos. En la Tabla 2 se presentan los parámetros de las fibras ópticas SSMF, DSF y NZ-DSF a utilizarse, para el cálculo del cambio de fase producido por el efecto no lineal XPM y FWM.

Se presentan los siguientes de resultados teóricos, en cada caso se usarán tres pulsos ópticos propagándose por una fibra óptica ya sea SSMF, DSF o NZ-DSF.

A. Análisis y simulación del efecto no lineal XPM en una fibra1) monomodo SSMF transmitiendo una Potencia Bomba con una separación de 0,2nm entre canales

La Tabla 3 indica las potencias utilizadas para la simulación, estos valores se encuentran dentro del rango de mayor impacto del efecto XPM; como se observa en la Fig. 2, el desfase calculado debido al efecto XPM para tres pulsos que se propagan en una fibra monomodo SSMF de 20km, está en el rango aproximado de 0 a 0.3 rad. Para una longitud de 200 Km de fibra monomodo SSMF con separación de 0,2nm, se tiene un desfase que se encuentra en el rango de 0 a 0.5 rad

Tabla 3. Cambio de fase producida por XPM para 20 km y 200 km con espaciamiento de 0,2nm para una fibra SSMF

Potencia	(mw)	P1	P2	P3
		10	40	12
Longitud de onda (nm)		1550,92	1551,12	1551,32
L: 20 km	Leff (km)	11,348	11,348	11,348
	Desfase ϕ (rad)	15,81023	15,81023	15,81023
L: 200 km	Leff (km)	0,456264	0,336151	0,447855
	Desfase ϕ (rad)	0,327489	0,241277	0,321661

Con una separación de 0,2nm (valor usado en WDM) se busca analizar el comportamiento del efecto XPM trabajando en escenarios extremos como es un espaciamiento de 25GHz entre canales. En la Fig. 7 se observa que cada pulso con desfase provoca ensanchamiento del pulso y atenuación

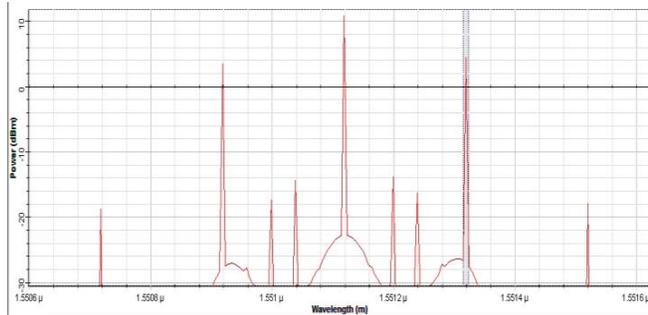


Figura 7. Señal de salida para tres pulsos transmitiéndose en una fibra SSMF para 20km.

Se observa en la Fig. 8 el resultado de la simulación con los pulsos luego de ser transmitidos a una distancia de 200km.

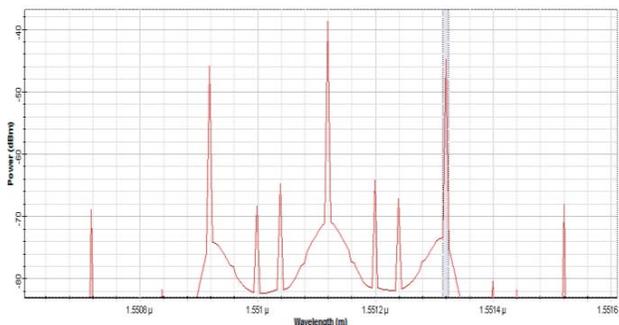


Figura 8. Señal de salida para tres pulsos en dBm transmitiéndose en una fibra SSMF para 200km

De acuerdo a la Fig. 7, los pulsos luego de ser transmitidos a una distancia de 20km de fibra SSMF continúan simétricos, pero se logra visualizar que existe un leve ensanchamiento en los pulsos. Se verifica que los resultados obtenidos mediante la simulación concuerdan con los calculados en la Tabla 3.

En la Fig. 8 se observan los pulsos significativamente más atenuados luego de ser transmitidos a una distancia de 200km de fibra SSMF, además se observa que los picos de menor potencia presentan un leve ensanchamiento en la parte adyacente al pulso de mayor potencia, sin embargo no se verifica cambio en los espectros a simple vista.

El efecto XPM en las fibras SSMF no es tan abrupto a pesar de cumplir con las potencias propicias para generarlo y contar con un espaciamiento tan pequeño entre pulsos como lo es 0,2nm.

B. Análisis y simulación del efecto no lineal XPM en una fibra monomodo DSF transmitiendo una Potencia Bomba con una separación de 0,2nm entre canales

La Tabla 4 muestra el desfase producido por el efecto XPM para tres pulsos que se propagan en una fibra monomodo DSF de 20km. Como indica la tabla las señales se encuentran en el rango de desfase aproximado de 0.5 a 1 rad. Para una fibra DSF de 200 Km, el mismo es cercano a 1 rad, por lo que se espera un ensanchamiento del pulso.

Tabla 4. Cambio de fase producida XPM para 20 km y 200 km con espaciamiento de 0,2nm para una fibra DSF

Potencia	(mw)	P1	P2	P3
		10	40	12
Longitud de onda (nm)		1550,92	1551,12	1551,32
L: 20 km	Leff (km)	9,939284	9,939284	9,939284
	Desfase ϕ (rad)	12,42236	12,42236	12,42236
L: 200 km	Leff (km)	1,095726	0,807273	1,076226
	Desfase ϕ (rad)	0,876704	0,645909	0,860547

En la Fig. 9 se presentan los resultados de la simulación, observándose que cada pulso es ensanchado y tiende a desarrollar nuevos pulsos deteriorando así la señal.

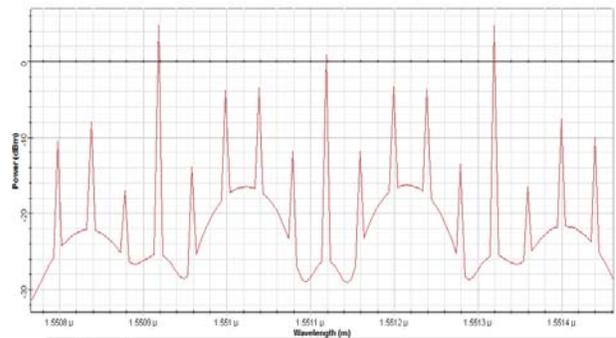


Figura 9. Señal de salida para tres pulsos en dBm transmitiéndose en una fibra DSF para 20km

Para observar mejor el efecto y el cambio de fase que experimentaron los pulsos prueba y bomba se han capturado la salida en dBm y es ilustrada en la Fig. 9.

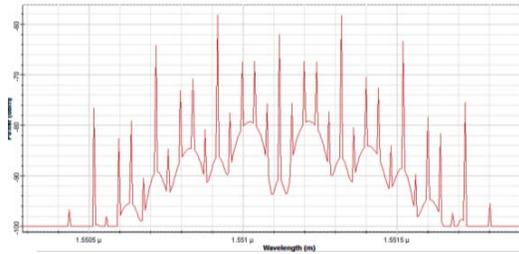


Figura 10. Señal de salida para tres pulsos transmitiéndose en una fibra DSF para 200km

Los resultados teóricos muestran que en la fibra monomodo DSF con separación de 0,2nm a 200km de distancia, la presencia de XPM con relación a 20km es más acentuada todavía, lo cual se corrobora con la simulación como se observa en la Fig. 10.

En la fibra óptica DSF con una distancia de 20km los pulsos ya experimentan un cambio de fase, inclusive el desfase de la señal bomba, esto se verifica con los resultados mostrados en la Tabla 4, los cuales exponen el rango aproximado de $\pi/2$ a π de desfase, de acuerdo a la Fig. 9 se observa que cada pulso es ensanchado y desarrolla nuevos pulsos deteriorando así la señal. En la Fig. 10 se muestra el espectro de salida a una distancia de 200km y un rango de π a $1,5\pi$ de desfase, esto concuerda con los resultados de la Tabla 4.

C. Análisis y simulación del efecto no lineal XPM en una fibra monomodo NZ-DSF transmitiendo una Potencia Bomba con una separación de 0,2nm entre canales

La Tabla 5 indica el resultado del desfase producido por el efecto XPM para tres pulsos que se propagan en una fibra monomodo NZ-DSF de 20km y 200km, las señales se encuentran en el rango de desfase aproximado de 0 a 0.5 rad.

Tabla 5. Cambio de fase producida XPM para 20 km y 200 km con espaciamiento de 0,2nm para una fibra NZ-DSF

Potencia	(mw)	P1	P2	P3
		10	40	12
Longitud de onda (nm)		1550,92	1551,12	1551,32
L: 20 km	Leff (km)	13,07567	13,07567	13,07567
	Desfase ϕ (rad)	15,81023	15,81023	15,81023
L: 200 km	Leff (km)	0,456264	0,336151	0,447855
	Desfase ϕ (rad)	0,451608	0,332721	0,44357

En la Fig. 11 se observa el resultado de la simulación. El efecto XPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF para tres pulsos propagándose a una distancia de 200km se incrementa proporcionalmente con la distancia, de acuerdo a los datos correspondientes a la Tabla 5.

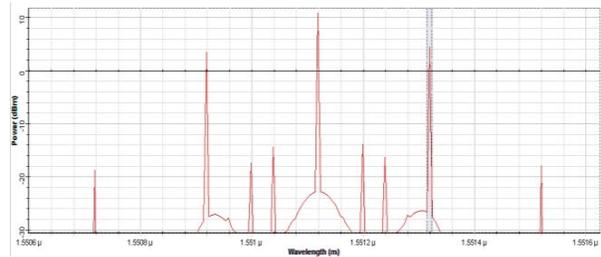


Figura 11. Señal de salida para tres pulsos en dBm transmitiéndose en una fibra NZ-DSF para 20km

Para una distancia de 200km, como se observa en la Fig. 12, se ensanchan los pulsos espectrales

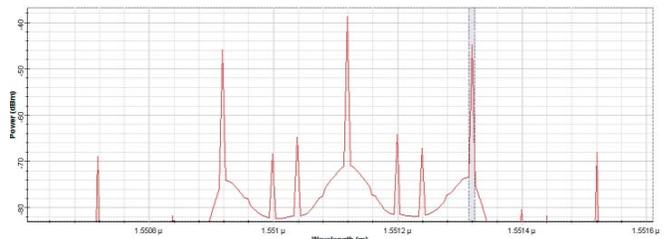


Figura 12. Señal de salida para tres pulsos en dBm transmitiéndose en una fibra NZ-DSF para 200km

Los pulsos en fibras NZ-DSF sufrieron un notable efecto XPM, mayor que en las fibras SSMF pero no tan abrupto como en la fibra DSF, es decir el efecto XPM tiene un mayor impacto en los tipos de fibra DSF y es menos nocivo en los tipos de fibra SSMF. XPM tiene un mayor impacto en la fibra monomodo DSF que en las fibras SSMF y NZ-DSF, puesto que XPM depende de los parámetros de la fibra como es área efectiva, dispersión cromática, coeficiente de índice no lineal y longitud efectiva.

VI. SIMULACIÓN DEL EFECTO NO LINEAL MEZCLA DE CUATRO ONDAS

Se presenta el análisis del efecto no lineal FWM con ejemplos en los que varían ciertos parámetros del sistema WDM. Se muestra dos grupos de ejemplos, el primero con canales de igual espaciamiento y el segundo con espaciamiento desigual entre canales.

Tabla 6. Referencias de Longitudes No lineal y coherente

Parámetro	SSMF [km]	DSF [km]	NZ-DSF [km]
L_{NL}	11,53	41	81
L_{coh}	462,5	2234	2327
L	50	100	300

La Tabla 6 muestra los valores de longitud de fibra óptica referencial. En el cual si L es igual o mayor que el valor de longitud no lineal empieza a presentarse el fenómeno FWM, si L es igual o mayor que longitud coherente empieza a decaer el fenómeno hasta ya no ser relevante entre las interferencias. Se elige un valor dentro de este rango con el fin de realizar el análisis teórico y la simulación.

A. Análisis y simulación del efecto no lineal FWM en fibra SSMF a 50km y $P_0=10mW$ con igual espaciado y desigual.

Se presenta el estudio del efecto no lineal FWM en la fibra SSMF, con una longitud de 50km, la cual es comparable con la longitud no lineal y es mucho menor que la longitud coherente, estos datos indican que el efecto FWM estará presente. Además se utiliza un espaciado igual entre canales de 25GHz.

En la Tabla 7 se presentan los resultados teóricos de las potencias ópticas FWM con espaciado igual y desigual. Se observan los resultados teóricos con una fibra óptica SSMF a 50km de longitud y 10mW de potencia óptica de canales WDM. En esta ocasión se pueden visualizar que las frecuencias W_{ijk} ya no se superponen con las de los canales WDM.

Tabla 7. Potencias ópticas, fibra SSMF, espaciado igual, espaciado desigual

Frecuencia Generada [THz]	Espaciado Igual Sumatoria de Potencias [dBm]	Espaciado Desigual Sumatoria de Potencias [dBm]
192,750		-73,0957173
192,825		-59,47909947
192,850		-58,63273044
192,900		-63,95336341
192,925		-3,734553752
193,000	-51,95212101	-3,734553752
193,025	-34,54387416	-52,39007199
193,050	-3,733422826	
193,075	-3,725510582	-58,35809103
193,100	-3,733421827	-3,734553752
193,125	-34,55290308	
193,150	-51,94754682	
193,175		-56,85771025
193,200		-63,5249817
193,275		-73,0519979

En la Fig. 13 obtenida mediante simulación, se observa un patrón de potencias ópticas FWM con espaciado desigual, las cuales se sitúan cerca del valor de -50dBm.

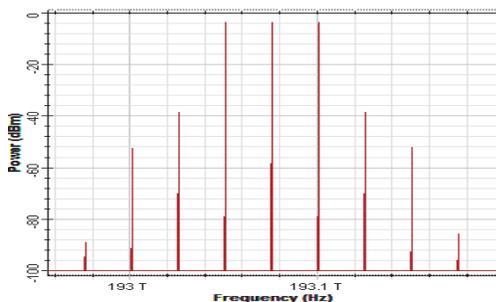


Figura 13. Espectro de frecuencias en fibra óptica SSMF con L=50km y $P_0=10mW$, espaciado igual

En la Fig. 14 obtenida mediante simulación, se observa un patrón de potencias ópticas FWM con espaciado desigual, las cuales se sitúan cerca del valor de -60dBm.

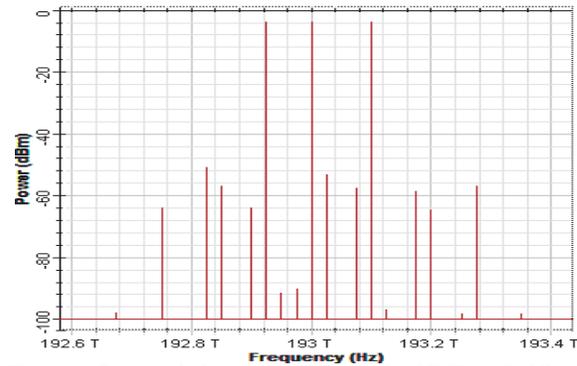


Figura 14. Espectro de frecuencias en fibra óptica SSMF con L=50km y $P_0=10mW$, espaciado desigual

Con una potencia de 10mW las potencias ópticas generadas FWM se encuentran a -30dB de las potencias de los canales WDM; si se eleva aún más la potencia de entrada, estas potencias ópticas generadas por FWM serán comparables y afectarán el sistema WDM.

En una fibra SSMF con potencias de 10dBm, la diferencia entre las potencias ópticas de FWM y las de los canales de señal es aproximadamente de 50dB, por esta razón estos valores no son comparables, aun así la potencia que consumen para generarse proviene de los canales WDM, esto implica que si se continúa aumentando la potencia de entrada va a causar interferencia entre canales a distancias superiores.

B. Análisis y simulación del efecto no lineal FWM en fibra DSF a 100km y $P_0=10mW$ con igual espaciado

Se presenta el estudio del efecto no lineal FWM en la fibra DSF, con una longitud de 100km, la cual es comparable con la longitud no lineal, y es mucho menor a la longitud coherente, estos datos indican que el efecto FWM estará presente.

Además se utiliza un espaciado igual entre canales de 25GHz. En la Tabla 8 se observa los resultados teóricos en los que las potencias FWM tienen valores comparables con las potencias de los canales WDM provocando interferencia, además con espaciado desigual las frecuencias parásitas FWM ya no se superponen a las de los canales WDM.

De igual manera en la gráfica de la simulación, Fig. 15, se observa que la diferencia en potencia entre los canales WDM y las frecuencias parásitas FWM es de 10dB, además se produce un mayor número de frecuencias parásitas FWM, esto se debe al alto valor de potencia que ingresa en los canales WDM provocando FWM.

Tabla 8. Potencias ópticas, fibra DSF, espaciamento igual, espaciamento desigual.

Frecuencia Generada [THz]	Espaciamento Igual Sumatoria de Potencias [dBm]	Espaciamento Desigual Sumatoria de Potencias [dBm]
192,75		-71,6167
192,825		-57,78676
192,85		-57,08936
192,9		-62,02157
192,925		-24,96068
193,000	-50,20165	-24,96068
193,025	-34,21259	-50,6898
193,050	-24,82428	
193,075	-23,97886	-57,33658
193,100	-24,82593	-24,96068
193,125	-34,30588	
193,150	-50,35997	
193,175		-55,71744
193,2		-62,34597
193,275		-72,18335

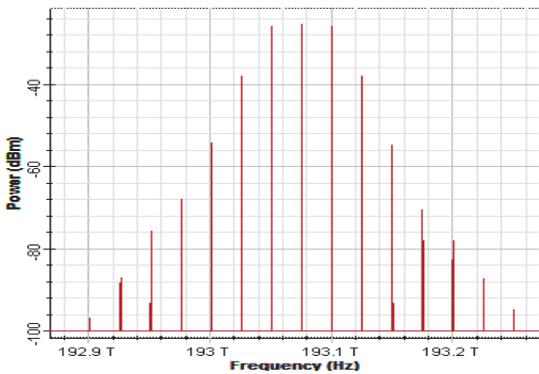


Figura 15. Espectro de frecuencias en fibra óptica DSF con L=100km y Po=10mW y espaciamento igual

Al ser las potencias comparables, el efecto FWM hace que ya no se vea un sistema de 3 canales sino de 5 canales WDM, generando un mayor número de frecuencias parásitas FWM.

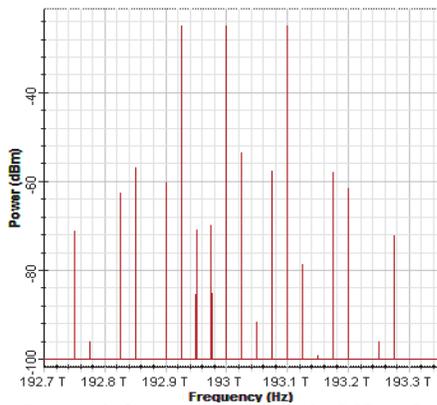


Figura 16. Espectro de frecuencias en fibra óptica DSF con L=100km y Po=10mW espaciamento desigual.

En la Fig. 16 se observa un patrón de frecuencias ópticas con espaciamento desigual, las potencias ópticas FWM se sitúan cerca del valor de -60dBm. Esto implica que el efecto no lineal FWM sobre la fibra óptica DSF, no va a tener potencias ópticas de canal parásitas semejantes al valor de las potencias de los canales WDM.

C. Análisis y simulación del efecto no lineal FWM en fibra NZ-DSF a 300km y P₀=10mW con igual espaciamento y espaciamento desigual.

En la Tabla 9 se observan los resultados de los cálculos teóricos con fibra NZ-DSF a 300km y 10mW de potencia óptica de canales WDM. En esta ocasión se pueden visualizar las cuatro frecuencias W_{ijk}, que están en el orden de -65dBm y -82dBm. Para el caso de espaciamento desigual se visualiza que las frecuencias W_{ijk} ya no se superponen con las de los canales WDM y tienen una diferencia de 40 dB

Tabla 9. Potencias ópticas espaciamento igual, espaciamento desigual

Frecuencia Generada [THz]	Espaciamento Igual Sumatoria de Potencias [dBm]	Espaciamento Desigual Sumatoria de Potencias [dBm]
192,75		-102,6132322
192,825		-88,79627176
192,85		-88,10318374
192,9		-93,04169683
192,925		-49,93259819
193,000	-81,37197436	-49,93259819
193,025	-64,87085888	-81,73465049
193,050	-49,88984415	
193,075	-49,6048622	-88,39121562
193,100	-49,89065607	-49,93259819
193,125	-64,99208286	
193,150	-81,56228958	
193,175		-86,80597697
193,2		-93,42631925
193,275		-103,2869738

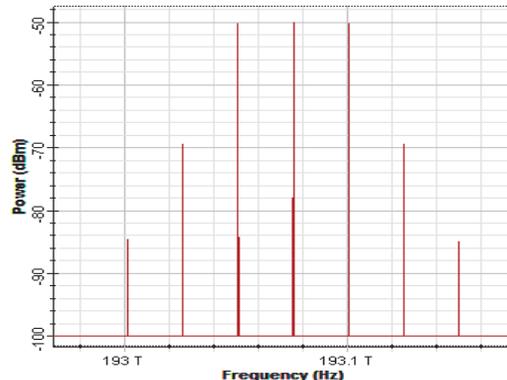


Figura 17. Espectro de frecuencias en fibra óptica NZ-DSF con L=300km y Po=10mW espaciamento igual

En la Fig. 17 se puede observar las potencias de los canales WDM y los cuatro canales generados FWM, su diferencia es de 20dB, por esta razón ya deben tomarse en cuenta porque podrían alterar la potencia de los canales principales WDM.

En la Fig. 18 se observa un patrón de potencias ópticas FWM con espaciamiento desigual, las cuales se sitúan cerca del valor de -90dBm.

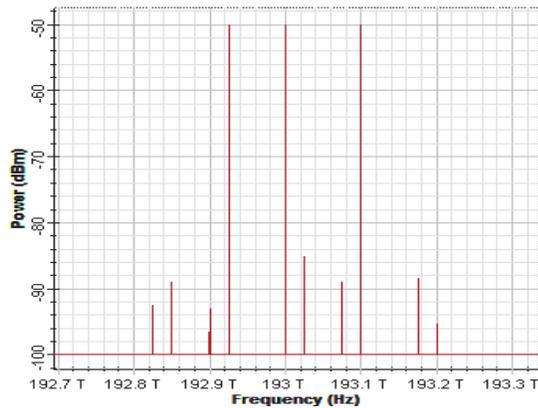


Figura 18. Espectro de frecuencias en fibra óptica NZ-DSF con L=300km y Po=10mW espaciamiento desigual.

A valores de potencia similares a 10mW con espaciamiento igual entre canales, el efecto no lineal FWM en fibras NZ-DSF llega a ser significativo, en este ejemplo hay una diferencia de 20dB entre la potencia de los canales WDM y las potencias ópticas FWM, por esta razón estas potencias ya empiezan a causar interferencia.

En el caso de espaciamiento desigual se observa que la diferencia entre las potencias ópticas FWM aumenta en un rango de 30dB, el patrón que se genera tiene potencias ópticas FWM de valores aproximados a -92dBm. Esto implica que el efecto no lineal FWM sobre la fibra óptica NZ-DSF se puede considerar como despreciable, es por esta razón que las fibras NZ-DSF de gran área efectiva se diseñaron para tolerar de mejor manera los efectos no lineales.

VII. CONCLUSIONES

El fenómeno no lineal XPM depende principalmente de la potencia del canal y el espaciamiento entre ellos, aunque también otros factores influyen directamente como el tipo de fibra, área efectiva, índice de dispersión, longitud efectiva, entre otros.

Los mecanismos que ayudan a minimizar el efecto no lineal XPM son: aumentar la separación entre canales y aumentar el área efectiva de la fibra como se muestra en las simulaciones con los distintos tipos de fibra, es decir en vez de trabajar con una fibra DSF que tiene menor área efectiva, se prefiere una fibra de mayor área efectiva como NZ-DSF o SSMF.

Se puede determinar que al aumentar el número de canales transmitidos por el sistema WDM sobre una fibra óptica

monomodo, éstos interactuarán entre sí produciendo de manera acelerada nuevas frecuencias FWM, las cuales pueden afectar directamente a los canales de comunicación que se están utilizando.

La generación del fenómeno FWM en una fibra monomodo depende en gran medida, de sí el espaciamiento entre los canales es igual o diferente; ya que al existir una distribución igual entre canales, las frecuencias generadas FWM se aglomeran sobre las señales de comunicación, disminuyendo el nivel de señal a ruido del sistema.

Cuando un conjunto de señales que fue afectado por el efecto no lineal FMW, y las potencias de las frecuencias parásitas llegan a ser comparables con las de los canales WDM, al transcurrir el tiempo y combinarse nuevamente estas señales genera nuevas frecuencias parásitas, provocando que el efecto FWM se vuelva más complejo.

Las fibras ópticas NZ-DSF de área efectiva extendida producen una mejor distribución de la potencia, por lo tanto reducción en la potencia pico y a su vez frecuencias generadas FWM más bajas.

REFERENCIAS

- [1] A. Carrera, M. Jiménez. "Estudio y Simulación del Efecto No Lineal Automodulación de Fase en Fibras Ópticas Monomodo". Revista Politécnica, Vol 35, No. 1, 2015.
- [2] G.P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", New York: Academic Press, 4ta Edition, 2001.
- [3] G. Keiser, "Optical Fiber Communication", Third Edition, San Diego, California: Academic Press 2000.
- [4] I. P. Kaminow and T. L. Koch, Optical Fiber Telecommunications IIIA, San Diego, California: Academic Press pag 496.
- [5] Recomendación de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones ITU, ITU-T G.652, (11/2009).
- [6] Recomendación de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones ITU, ITU-T G.653, (07/2010).
- [7] Recomendación de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones ITU, ITU-T G.655, (11/2009).
- [8] J. G. López , A. Toledo, H. Ordóñez y J. P. Agredo, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM", Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Octubre 2011.
- [9] J. Toulouse, "Optical Nonlinearities in Fibers: Review, Recent Examples, and Systems Applications", Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 11. 2005.
- [10] L. Vrizlynn, P. Shum, and M. Rao, "Bandwidth-Efficient WDM Channel Allocation for Four-Wave Mixing-Effect Minimization", IEEE Transactions on Communications, 2004.
- [11] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan and G. H. Sasaki, "Optical Networks: A Practical Perspective". Third Edition. December 2009.

[12] R. Hui, M. O'Sullivan, "Fiber Optic Measurement Techniques" Elsevier Academic Press, San Diego, California, 2009, pag. 473-478.

[13] S. P. Singh and N. Sing, "Nonlinear effects in optical fibers: Origin, management and applications", Department of Electronics and Communication University of Allahabad, 2007 pag. 264

VIII. BIOGRAFÍAS



Andrea Puerres Alquedán, nacida en Ibarra-Ecuador el 20 de octubre de 1989. Sus estudios primarios los realizó en la Escuela Santa Marianita de Jesús. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Nacional "Ibarra", donde se graduó de Bachiller en Especialidad Físico-Matemático en el año 2007. Su formación profesional la realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones en el 2015. Cuenta con la certificación internacional CCNA Routing and Switching, CCNP Route, CCNP Troubleshooting, se encuentra en camino de certificación CCNP Switch.



Diana Salazar, nacido en Santo Domingo-Ecuador el 28 de enero de 1989. Sus estudios primarios los realizó en la Escuela San José de Calasanz. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Técnico Superior "Julio Moreno Espinosa", donde se graduó de Bachiller en Especialidad Físico-Matemático en el año 2007. Su formación profesional la realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones en el 2015. Cuenta con las certificaciones internaciones CCNA, CCDA, ITILv3, CCNP Routing and Switching

María Soledad Jiménez, Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional; Master of Science in Electrical Engineering, University of Texas at Arlington – USA . Actualmente se desempeña como profesora del Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información de la EPN. Área de interés: Comunicaciones Ópticas.