

# Análisis de los Efectos No Lineales de Modulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones Ópticas y Propuesta de Mecanismos Remediales

R. M. Adrián, J. J. María S.

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional

**Resumen:** En este trabajo se analiza el impacto de los fenómenos no lineales de Automodulación de Fase (SPM, Self Phase Modulation) y Modulación Cruzada de Fase (XPM, Cross Phase Modulation) en los sistemas de comunicaciones ópticos. Se realizan varias simulaciones utilizando OptiSystem y variando parámetros de transmisión tales como: longitud de onda de trabajo, velocidad de transmisión, tipo de fibra óptica y su longitud, potencia de transmisión, número de canales ópticos en sistemas WDM y su separación. Se analizan los resultados de las simulaciones y se proponen mecanismos remediales para mitigar el impacto de estos fenómenos no lineales. Las fibras ópticas utilizadas son aquellas reguladas por la ITU-T G.653 y G.655, siendo esta última una de las más usadas por los proveedores locales de servicios de telecomunicaciones.

**Palabras clave:** Automodulación de fase, Modulación cruzada de fase, Dispersión cromática, WDM, Chirp.

## I. INTRODUCCIÓN

La fibra óptica es uno de los medios de transmisión más utilizados gracias a sus grandes prestaciones como son: elevadas distancias de cobertura, baja atenuación y gran ancho de banda. Conforme avanza la tecnología la velocidad de transmisión alcanzada, utilizando este medio, es cada vez mayor así como la distancia a la que se transmite; en estas condiciones las señales transmitidas por fibra óptica están expuestas a los efectos no lineales como SPM (*Self-Phase Modulation*) y XPM (*Cross-Phase Modulation*), que se presentan justamente al utilizar altas velocidades de transmisión y potencias elevadas.

Estos efectos no lineales degradan la señal transmitida en la fibra óptica, es por ello que se han realizado variadas simulaciones con el fin de determinar las condiciones en las cuales estos efectos empiezan a manifestarse, así como la relación entre ellos. Una vez identificados los parámetros críticos que inciden y analizado extensos resultados de simulaciones realizadas, se proponen mecanismos remediales para mitigar estos efectos.

## II. ANÁLISIS DE PARÁMETROS RELEVANTES EN LA MODULACIÓN DE FASE EN FIBRAS ÓPTICAS

XPM y SPM están relacionados directamente con los parámetros de la fibra tales como: longitud efectiva, longitud no lineal, dispersión de velocidad de grupo y longitud de dispersión.

### A. Parámetros de la fibra óptica

#### 1) Longitud Efectiva

La interacción no lineal depende de la distancia de transmisión y el área transversal de la fibra por donde se propaga la luz, a mayor distancia de transmisión menor impacto de los efectos no lineales, pues la señal es debilitada por la atenuación a lo largo de la fibra óptica, esto quiere decir que los efectos no lineales ocurren temprano en la fibra óptica y van disminuyendo conforme la señal se propaga.

El modelamiento matemático para la longitud efectiva de una fibra óptica ( $L_e$ ) está dado por (1):

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (1)$$

Donde  $\alpha$  es el factor de pérdidas de la fibra. Nótese que  $L_e < 1/\alpha$  y  $L_e \rightarrow 1/\alpha$  para una gran longitud de fibra "L". [2]

#### 2) Longitud No Lineal

La longitud no lineal de una fibra ayuda a determinar la distancia a la cual los efectos no lineales se tornan importantes, la expresión que permite calcular esta longitud es (2):

$$L_{NL} = \frac{\lambda A_e}{2\pi \bar{n} P_0} \quad (2)$$

Donde  $L_{NL}$  es la longitud no lineal,  $A_e$  es el área efectiva de la fibra,  $P_0$  es la potencia pico del pulso,  $\bar{n}$  es el coeficiente de refracción no lineal y  $\lambda$  es la longitud de onda. Si la distancia del enlace es comparable o mayor que la distancia no lineal, el efecto de las no linealidades puede ser severo. [2]

#### 3) Dispersión de Velocidad de Grupo (GVD, Group Dispersion Velocity)

El parámetro clave en la evolución de la forma del pulso que se propaga por una fibra es la segunda derivada de la constante de propagación  $\beta$ , la primera derivada de dicha constante representa la velocidad con la que se propaga un pulso en la fibra óptica (también conocida como velocidad de grupo), la segunda derivada representa la tasa de cambio de dicha velocidad también

denominada dispersión de velocidad de grupo (GVD)  $\beta_2$ , la cual se observa en (3). [1]

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{dw^2} \quad (3)$$

Donde,  $\beta$  es la constante de propagación y  $w$  es la frecuencia. Si  $\beta_2$  fuese igual a cero, esto implicaría que la forma del pulso no se altera. [1]

#### 4) Longitud de Dispersión

Finalmente, la longitud de dispersión permite determinar la distancia a la cual los efectos de dispersión son significativos, esta longitud está definida por (4): [2]

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (4)$$

Donde  $L_D$  es la longitud de dispersión y  $T_0$  está relacionado con el ancho del pulso. [2]

#### B. Tipo de señal utilizada

Para realizar el estudio de los efectos no lineales se debe considerar el tipo de señal que se va a analizar, que en este caso corresponde a pulsos gaussianos. A continuación se muestra las características y las ventajas de utilizar este tipo de pulsos.

##### 1) Pulsos gaussianos

Se denomina pulso gaussiano a aquel cuya envolvente es una función gaussiana. La representación de un pulso gaussiano considerando la variación de frecuencia con el tiempo (denominado chirp) está definido por (5) [1]:

$$U_{(0,t)} = P_0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \cos \left[ w_0 t + \frac{c}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Donde  $P_0$  es la potencia máxima del pulso,  $T_0$  corresponde a la mitad del ancho del pulso, "c" es el factor de chirp el cual determina el grado de variación de la frecuencia del pulso y,  $w_0$  representa la frecuencia central del pulso.

##### 2) Pulsos super gaussianos

Los pulsos super gaussianos se utilizan cuando el factor GVD gobierna la transmisión, es decir cuando este factor es muy degradante para la señal. La ecuación que representa este tipo de pulsos es (6) [1]:

$$U_{(0,t)} = P_0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^{2m} \right] \cos \left[ w_0 t + \frac{c}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^{2m} \right] \quad (6)$$

El parámetro "m" determina la forma del pulso transmitido, a medida que su valor aumenta el pulso adquiere una forma más rectangular. Cuando adquiere el valor de uno corresponde al caso de un pulso gaussiano, cuando su valor es tres, este corresponde a un pulso super gaussiano.

En la Fig.1 se pueden observar dos pulsos gaussianos, con "m" igual a uno y tres respectivamente:

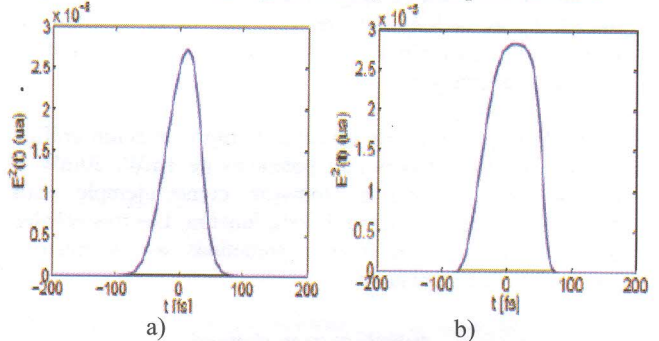


Fig. 1. Forma de pulso con  $m=1$ (a) y  $m=3$  (b) [1]

En este estudio se han utilizado este tipo de pulsos por tres motivos fundamentales:

- La transformada de Fourier de un pulso gaussiano es otro pulso gaussiano, de esta manera la resolución de las ecuaciones matemáticas se facilita.
- Los láseres fabricados con materiales semiconductores emiten pulsos que adquieren un cierto chirp cuando se modulan directamente. Es decir que este modelo se aproxima a la realidad.
- La dispersión y los efectos no lineales pueden provocar que pulsos que no tenían chirp al momento de ser transmitidos lo adquieran conforme se propagan a través de la fibra óptica.

### III. AUTOMODULACIÓN DE FASE (SPM)

Este fenómeno es el producto de un excesivo nivel de potencia. Cuando el haz de luz tiene demasiada potencia causa un pequeño incremento en el índice de refracción de la fibra óptica, esto puede provocar que la parte de la señal que posee una mayor potencia se vea retardada con respecto a la de baja potencia, lo que finalmente conduce a que el pulso experimente un ensanchamiento.

Este efecto ocasiona que el pulso transmitido adquiera un chirp de frecuencia (variación de la frecuencia con el tiempo), pues el mismo se auto modula en fase, este chirp provoca un ensanchamiento en el pulso.

La combinación de SPM con los efectos de dispersión cromática que ocurren en la fibra puede conducir a una degradación importante de los pulsos transmitidos y, por tanto es esencial considerarlo para sistemas de altas tasas de transmisión. [1]

#### A. Análisis en el régimen temporal de SPM

En la práctica SPM toma importancia al diseñar sistemas que operan a velocidades superiores a 10Gbps, limitando la potencia de transmisión a unos pocos mili vatios. Numéricamente el chirp inducido por SPM y la dispersión pueden ser estudiados resolviendo (7). [2]

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{1 + \sqrt{2} \frac{L_e}{L_{NL}} * \frac{L}{L_D} + \left( 1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} * \frac{L_e^2}{L_{NL}^2} \right) \frac{L^2}{L_D^2}} \quad (7)$$

Donde  $T_L$  es el ancho del pulso tras haberse propagado por una fibra óptica de longitud  $L$ ,  $T_0$  es el ancho del pulso inicial,  $L_e$  es la longitud efectiva,  $L_{NL}$  es la longitud no lineal,  $L_D$  es la longitud de dispersión y  $L$  es la longitud de la fibra de transmisión.

En la Fig. 2 se puede observar la representación gráfica de (7) para tres señales con potencias de 1mW, 20mW y 60mW; estos valores se tomaron como ejemplo para analizar el comportamiento de esta función. Las tres señales de diferente potencia fueron sometidas a los mismos parámetros de transmisión.

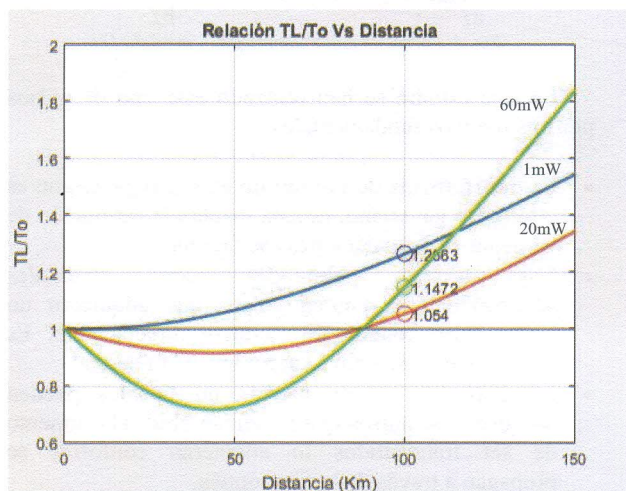


Fig. 2. Curva de la relación  $T_L/T_0$  en función de la distancia y de la potencia

En esta figura se puede observar que existe una región donde  $T_L/T_0$  es inferior a la unidad, esto ocurre para las señales de potencias 20mW y 60mW, lo que significa que en esta región el pulso sufre una compresión inicial, la cual puede ser aprovechada para ayudar a compensar el efecto de GVD. [2]

B. Análisis espectral del impacto de SPM

Para realizar el análisis espectral cuando se presenta SPM se debe incluir un nuevo parámetro llamado cambio de fase máximo ( $\varphi_{max}$ ), el cual se muestra en (8). [1]

$$\varphi_{max} = \frac{L_e}{L_{NL}} \tag{8}$$

El ensanchamiento espectral es consecuencia de la dependencia con el tiempo de este factor, esto se puede entender notando que las variaciones temporales de fase implican que la frecuencia óptica instantánea difiere de la frecuencia central del pulso  $w_0$ , esta diferencia está dada por (9). [1]

$$\delta W_{max} = 0.86 * T_0^{-1} \varphi_{max} \tag{9}$$

En la Fig. 3 se aprecia la distorsión que sufre el espectro de un pulso óptico para valores de  $\varphi_{max}$  superiores a  $0.5\pi$ . [1]

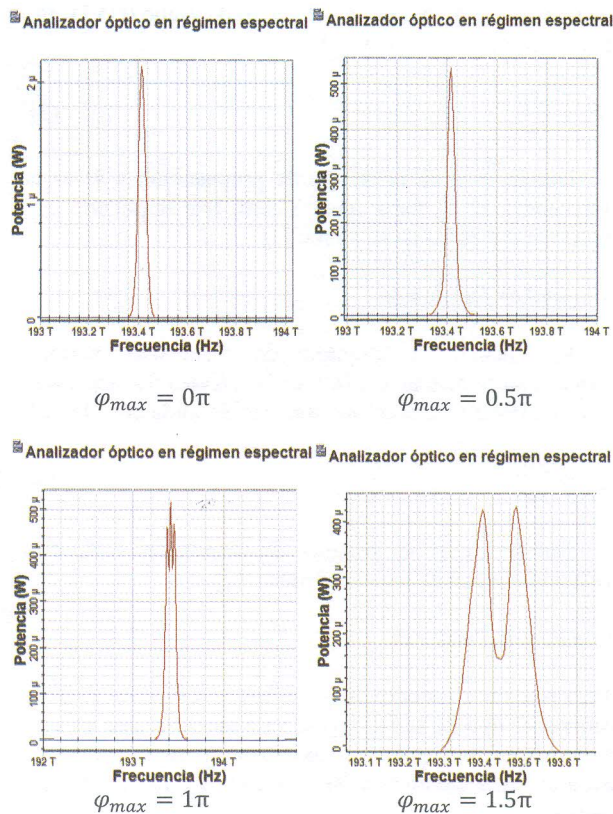


Fig. 3. Cambio de la forma del espectro en función del parámetro  $\varphi_{max}$

IV. MODULACIÓN CRUZADA DE FASE (XPM)

El efecto SPM puede provocar que alguna otra señal que viaja en la misma fibra a otra longitud de onda cambie su fase, esto da origen a la modulación cruzada de fase XPM. Este fenómeno toma mucha relevancia en los sistemas WDM, debido a que el índice de refracción no es lineal y los diferentes canales (longitudes de onda) interactúan entre sí, entendiéndose que cada canal corresponde a una portadora óptica con una longitud de onda diferente. Este efecto conduce a la distorsión de los pulsos transmitidos y es un factor limitante en los sistemas de alta capacidad.

Para analizar este fenómeno es suficiente considerar un sistema WDM con dos canales, como se muestra en (10). [2]

$$E_{(r,t)} = E_1 \cos(w_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cos(w_2 t - \beta_2 z) \tag{10}$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  corresponden a la intensidad de campo eléctrico de dichos pulsos, “z” es el eje de propagación,  $\beta_1, \beta_2$  son los coeficientes de propagación,  $w_1$  y  $w_2$  corresponden a las frecuencias centrales de cada señal. [2]

La componente de la polarización dieléctrica a la frecuencia  $w_1$  es (11):

$$\frac{3}{4} \epsilon_0 X^{(3)} (E_1^2 + 2E_2^2) E_1 \cos(w_1 t - \beta_1 z) \tag{11}$$

Se puede observar que el campo tiene una componente sinusoidal que varía en proporción a  $E_1^2 + 2E_2^2$ . El primer término se debe al efecto de SPM, el segundo término es consecuencia de XPM. En el caso en que  $E_1 = E_2$ , es decir

cuando los dos campos tienen la misma intensidad, se observa que el efecto de XPM es dos veces peor que el de SPM [2]. En esta última expresión se puede notar que si SPM no existe XPM tampoco existirá. El efecto de XPM es cualitativamente similar a SPM, por eso se espera que el chirp y por consiguiente la dispersión de los pulsos por SPM en sistemas WDM se vea agravado.

### V. FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO ANALIZADAS

#### A. Fibra Monomodo de Dispersión Desplazada Nula (DSF, Zero Dispersion Shifted Fiber, Norma ITU-T G.653)

Esta fibra está diseñada para tener una dispersión cromática nula en la ventana de 1550nm, para la cual la atenuación es mínima. Los efectos de la dispersión cromática son pequeños en la ventana de 1310nm, sin embargo los sistemas que trabajan en esta ventana son limitados por la atenuación. La mayor parte de los sistemas de comunicaciones trabajan en la ventana de 1550nm debido a que en esta región la atenuación es mínima y responden bien los amplificadores ópticos.

Estas fibras tienen un coeficiente de dispersión nulo en 1550nm y máximo de 3.3ps/nm.km en la banda C (1530nm – 1570nm). Los parámetros utilizados de esta fibra que son relevantes en este estudio se encuentran normados por la ITU-T G.653, y son: atenuación, dispersión en relación a la longitud de onda y área efectiva la cual está normada en ITU G.650. [2] [6]

#### B. Fibra Monomodo de Dispersión Desplazada No Nula (NZDSF, Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber, Norma ITU-T G.655)

Si bien la fibra DSF tiene un coeficiente de dispersión cromática nulo en 1550nm, desafortunadamente esto no es útil para sistemas WDM por la aparición de otros fenómenos no lineales, esencialmente el de mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), el cual se presenta fundamentalmente cuando la dispersión cromática es nula.

La presencia de estos fenómenos no lineales (debido a la interacción de ondas que viajan a diferentes velocidades de grupo) puede ser evitada o controlada si la fibra tiene un poco de dispersión cromática. Esto llevó a la creación de fibras NZDSF, las cuales tienen un coeficiente de dispersión cromática no nulo en 1550nm, el cual típicamente está entre 1 y 6 ps/nm.km o entre -1 y -6 ps/nm.km en banda C, esto disminuye la presencia de efectos no lineales, esencialmente FWM, conservando la mayor parte de las ventajas de la fibra DSF. [7]

La tabla I muestra un ejemplo de los resultados numéricos obtenidos para  $T_L/T_0$  y  $\varphi_{max}$  en el caso de la fibra G.655.C con un coeficiente de atenuación de 0.35dB/km y un coeficiente de dispersión de velocidad de grupo (GVD) de -1.32 ps<sup>2</sup>/km [7], trabajando a 1530nm. Se utilizó (7) y (8) en diferentes condiciones de velocidad, potencia y longitud de la fibra de transmisión y, considerando aquellos valores límite de distancia de transmisión que son de interés donde  $T_L/T_0$  empieza a ser superior a la unidad para cada caso.

TABLA I  
EJEMPLO DE RESULTADOS NUMÉRICOS DE  $T_L/T_0$  y  $\varphi_{max}$  PARA LA FIBRA G.655.C

$\lambda$ (nm)	Vt(Gbps)	$P_0$ (mW)	L (km)	$\frac{T_L}{T_0}$	$\varphi_{max}$
1530	10	1	700	1.05	$0.005\pi$
		20	1200	1.05	$0.20\pi$
		40	1500	1.02	$0.21\pi$
		60	1700	1.03	$0.31\pi$
		100	1600	1.04	$0.52\pi$
	40	1	39	1.043	$0.005\pi$
		20	60	1.01	$0.1\pi$
		40	100	1.04	$0.21\pi$
		60	110	1.05	$0.31\pi$
		100	100	1.049	$0.52\pi$
	100	1	6	1.042	$0.002\pi$
		20	6	1.01	$0.04\pi$
		40	11	0.01	$0.12\pi$
		60	15	1.01	$0.22\pi$
		100	17	1.03	$0.39\pi$

### VI. SIMULACIÓN DE SPM Y XPM

#### A. Simulación para SPM

El diagrama utilizado en esta simulación se representa en la Fig.4:

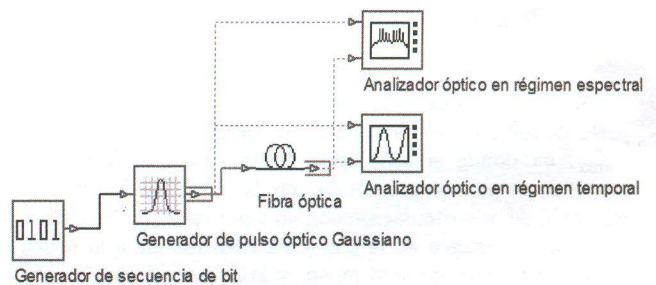


Fig. 4. Diagrama empleado para la simulación de SPM

Los elementos utilizados en este escenario de simulación para SPM son:

- Generador de secuencia de bits: en este bloque se define la velocidad de transmisión y la secuencia de bits a transmitir. Para propósitos de realizar las comparaciones necesarias, se ingresó en este bloque la secuencia de bits adecuada en todos los casos a fin de obtener la misma señal.
- Generador de pulsos gaussianos: este bloque se conecta directamente con el generador de secuencia de bits, tiene como parámetros la potencia de transmisión, la longitud de onda de la señal resultante y el ancho del pulso gaussiano.
- Fibra óptica: este bloque se conecta directamente con el generador de pulsos gaussianos, aquí se ingresan todas las características de la fibra óptica como son: atenuación, coeficientes GVD, área efectiva, distancia, frecuencia central y se habilita la simulación de los efectos no lineales.
- Analizadores de señal tanto para el régimen temporal como para el espectral: estos bloques permiten la

visualización de la señal en el régimen respectivo. Se colocaron estos bloques tanto a la salida del generador de pulsos gaussianos como a la salida de la fibra óptica, para comparar la señal de entrada con la señal de salida de la fibra de transmisión.

La Fig. 5 muestra el resultado de la simulación de SPM para el caso en que el valor de  $\frac{T_L}{T_0} = 1.04$ , utilizando una secuencia de bits: 0110111, a fin de poder observar el impacto de los fenómenos no lineales en dos y tres pulsos gaussianos consecutivos.

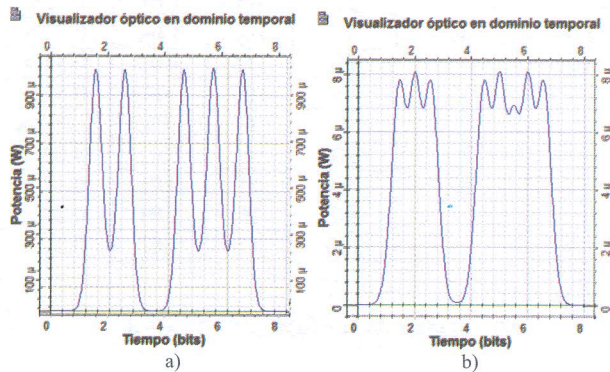


Fig. 5. a) Forma temporal de la señal inicial, b) Señal degradada por SPM para  $\frac{T_L}{T_0} = 1.04$

Se puede observar un cambio degradante en la forma de la señal de salida con respecto a la señal inicial, por efecto de SPM.

En el análisis del impacto en el espectro de la señal por parte de los efectos no lineales, la variable a considerar es  $\varphi_{max}$ , en donde si este valor supera  $0.5\pi$ , la forma del espectro se ve comprometida, en la Fig.6 se observa el resultado de una simulación con un valor de  $\varphi_{max} = 1.05\pi$ , en donde la imagen de la izquierda corresponde a la forma del espectro para un solo pulso, y la imagen de la derecha corresponde a la forma del espectro para el mismo pulso luego de haberse propagado por la fibra óptica y haberse presentado SPM degradando el espectro del pulso.

Lo cual corrobora el hecho de que el impacto de SPM se rige por los valores de  $\frac{T_L}{T_0}$  y  $\varphi_{max}$ .

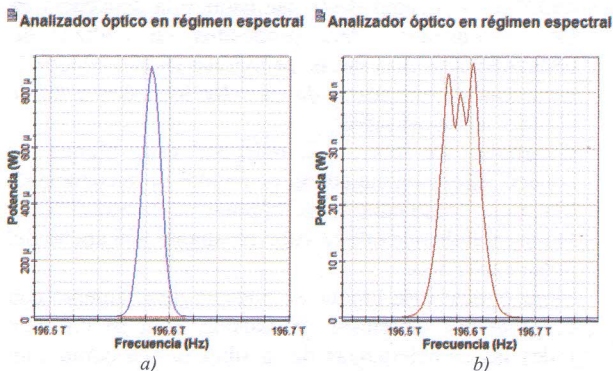


Fig. 6. Resultado de la simulación para SPM con un solo pulso a) Forma espectral del pulso inicial, b) Forma espectral del pulso de salida con  $\varphi_{max} = 1.05\pi$

### A. Simulación para XPM

Para estas simulaciones se considera casos en los que SPM se manifiesta, pues como se vio XPM solo existe si SPM existe. Además para analizar el efecto de XPM se considera un sistema WDM de 5 canales ópticos multiplexados.

El diagrama implementado con OptiSystem para simular el efecto no lineal XPM se muestra en la Fig. 7:

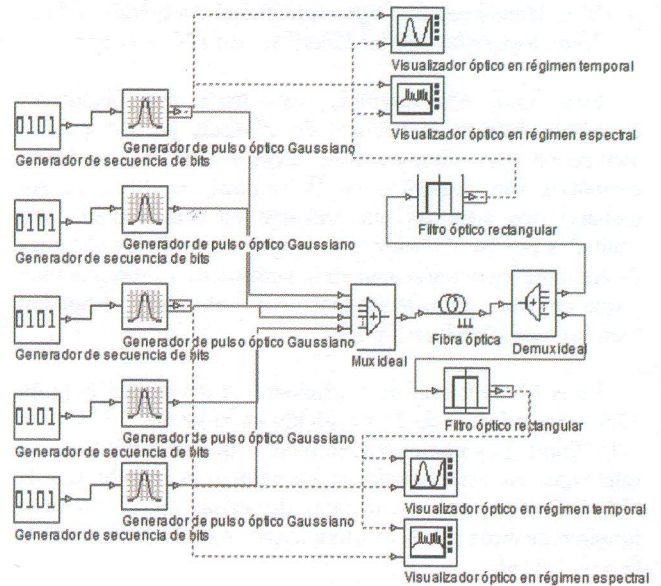


Fig. 7. Diagrama empleado para la simulación de XPM

Este diagrama consta de los siguientes elementos:

- Generadores de secuencias de bits: cada uno de los generadores tiene su propia secuencia de 8 bits y todos a una velocidad de transmisión definida posteriormente en cada caso.
- Generadores de pulsos gaussianos: estos bloques permiten convertir la señal binaria proveniente de los generadores de secuencias de bits en pulsos gaussianos. El ancho de estos pulsos corresponde a la mitad de tiempo de bit, la potencia de transmisión es configurada de acuerdo a cada caso de estudio ingresando un valor numérico en dBm en la casilla correspondiente y la longitud de onda que entrega cada generador está en correspondencia con la separación que van a tener los canales entre sí, estos valores pueden ser ingresados en el simulador en Hertz o en nanómetros.
- Multiplexor ideal: este bloque permite intercalar en longitud de onda (para simular un sistema WDM) varias señales que se transmitirán por un solo hilo de fibra, el número de señales puede variarse. Este bloque no tiene pérdidas y el único parámetro a configurar es el número de entradas.
- Fibra óptica: este bloque ayuda a simular la fibra en estudio, las características son propias de cada caso.
- Demultiplexor ideal: este bloque permite separar (demultiplexar en WDM) la señal proveniente de la fibra en varias señales, no tiene pérdidas y el único parámetro a configurar es el número de canales en la salida.

- Filtros rectangulares: se optó por este filtro para discriminar de mejor manera las señales deseadas, se utilizaron dos filtros para determinar la señal más afectada por XPM, que se ubicaron a la salida del demultiplexor. Los únicos parámetros a configurar en este bloque son la longitud de onda y el ancho de banda, puesto que se lo considera sin pérdidas para motivos de estudio.

Para este caso se utilizó la misma señal inicial WDM de 5 canales ópticos de la Fig. 5(a) con una frecuencia central de 193THz, una separación entre canales de 0.1THz y una potencia de 10mW, esto con el propósito de comparar el impacto cuando se presenta únicamente SPM respecto de cuando se presentan SPM y XPM conjuntamente.

En la Fig. 8 se presenta la afectación de XPM cuando  $T_L/T_0=1.04$ . No se puede observar una degradación considerable de la señal debido a que XPM no tiene mayor impacto en estas condiciones de baja potencia.

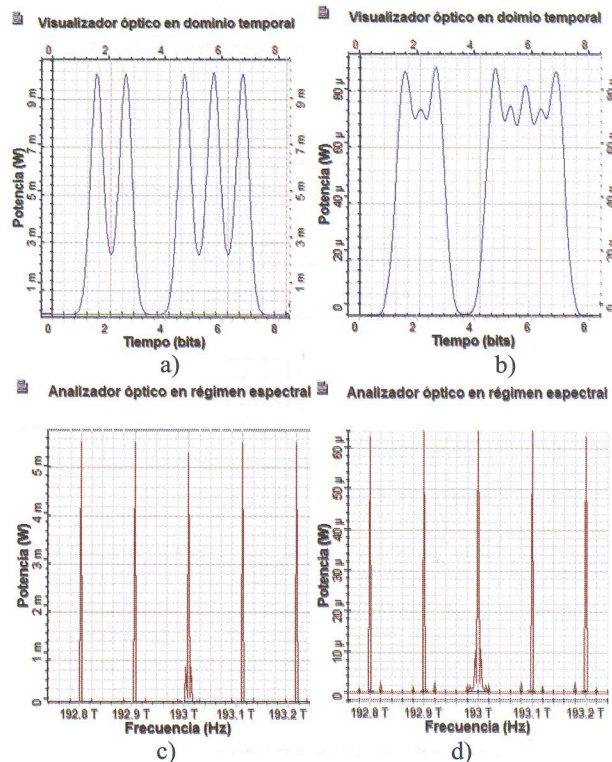


Fig. 8. Señal degradada por SPM y XPM conjuntamente para  $T_L/T_0 = 1.04$ .

a) Forma temporal de la señal inicial, b) Forma temporal de la señal propagada por la fibra óptica, c) espectro de la señal inicial, d) espectro de la señal propagada por la fibra óptica.

Para realizar el análisis del efecto de XPM se procede a aumentar la potencia de transmisión significativamente a un valor de 100mW al mismo sistema WDM de 5 canales anteriormente considerado. La Fig. 9 muestra la forma temporal y el espectro de la señal WDM, antes de aumentar la potencia de transmisión (a) y (c) y, luego de aumentar la potencia (b) y (d), respectivamente. Se puede observar que la contribución de XPM para bajos niveles de potencia no es muy significativa, sin embargo al aumentar la potencia hasta obtener un valor de  $\phi_{max} = 1.05\pi$ , para este caso, se aprecia una degradación considerable en el espectro de la señal al punto que ya no es posible reconocer los canales iniciales.

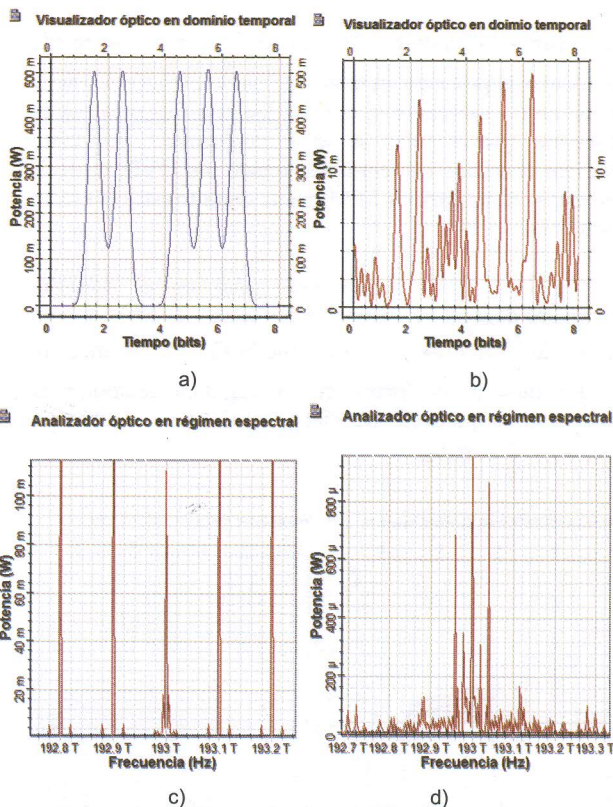


Fig. 9. Impacto de SPM y XPM, a) Señal temporal inicial del canal central, b) Señal temporal del canal central luego de recorrer la fibra afectada por SPM y XPM. c) Espectro de la señal WDM inicial d) Espectro de la señal WDM luego de recorrer la fibra afectada por SPM y XPM.

## VII. MECANISMOS REMEDIALES

Luego de haber analizado mediante simulación múltiples casos como se puede revisar en [8], y determinar los factores que pueden ser utilizados para mitigar el impacto de XPM y SPM, se proponen en esta sección algunos mecanismos remediales.

Para SPM y XPM el principal mecanismo remedial es el control de potencia, esto se logra utilizando amplificadores ópticos de línea colocados cada cierta distancia de la longitud de transmisión, de esta manera se evita el uso de potencias excesivas al inicio de la transmisión. Sin embargo, basándose en los resultados de este estudio realizado, se proponen otros mecanismos remediales que se mencionan a continuación.

### A. Mecanismos remediales para SPM

#### 1) Aumento de potencia de transmisión

Si bien es cierto que SPM está directamente relacionado con la potencia de transmisión, una solución es aumentar la potencia del pulso bajo determinadas condiciones, para el efecto es necesario tomar en cuenta que SPM no actúa solo, sino que actúa conjuntamente con GVD.

Para poder aplicar este mecanismo remedial es necesario tener presente la siguiente consideración: la potencia de transmisión en ningún caso puede ser mayor

a un límite definido por la relación  $\frac{T_L}{T_0}$ , esto es, se puede aumentar la potencia en tanto en cuanto el valor de dicha relación no sobrepase la unidad. De esta forma se puede asegurar que el pulso se va a comprimir y por tanto mitigar el ensanchamiento ocasionado por GVD, es decir en estas circunstancias SPM puede contrarrestar el efecto de GVD.

La Fig. 10(a) ilustra una señal en el dominio temporal degradada levemente por efecto de SPM con un valor de  $\frac{T_L}{T_0} = 1.04$ , en tanto que la Fig. 10 (b) muestra cómo mejora su forma en el régimen temporal al aumentar la potencia en dicha señal hasta obtener un valor de  $\frac{T_L}{T_0} = 0.84$ .

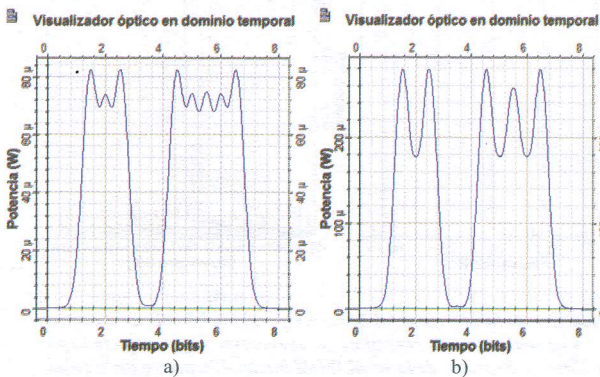


Fig. 10. a) Forma temporal de una señal afectada por SPM antes de aumentar la potencia,  $T_L/T_0 = 1.04$ , b) Forma de la señal después de aumentar la potencia,  $T_L/T_0 = 0.84$ .

Si bien este mecanismo remedial toma en cuenta que el valor de  $\frac{T_L}{T_0}$  no supere la unidad, sin embargo también es necesario considerar el valor de  $\varphi_{max}$ , puesto que al aumentar la potencia (aun cuando el valor de  $\frac{T_L}{T_0}$  no supere la unidad) este valor aumenta y puede ser mayor a  $\pi$ , produciendo variaciones en el espectro, como se observó en la Fig. 3.

2) *Uso de fibra compensadora de dispersión (DCF, Dispersion Compensating Fiber)*

Como se ha visto hasta aquí, el aumento de la velocidad de transmisión limita la distancia máxima que puede tener una transmisión sin regeneradores. Una forma de mitigar el impacto que tiene SPM y GVD es la utilización de fibras DCF. Este tipo de fibras tiene un coeficiente de dispersión mayor pero de signo contrario al de fibra de transmisión utilizada, de esta manera contrarresta la dispersión acumulada en la fibra óptica.

Para ilustrar este mecanismo de compensación se tomó una señal inicial igual a la presentada en la Fig. 5(a), la misma que se transmitió por una fibra óptica bajo ciertas condiciones a fin de que los efectos no lineales se presenten y el valor alcanzado por  $T_L/T_0$  sea 1.1, obteniendo el resultado que se observa en la Fig. 11, en la que se puede apreciar que la señal ha sido degradada considerablemente.

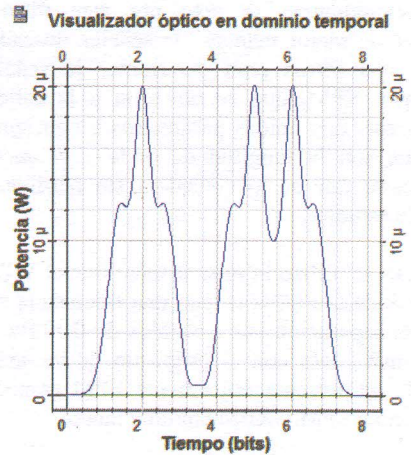


Fig. 11. Forma temporal de la señal transmitida por una fibra óptica en condiciones de  $\frac{T_L}{T_0} = 1.1$

Con el propósito de realizar la compensación mediante el uso de una fibra DCF, se modificó el diagrama de la simulación, incluyendo la fibra compensadora de la siguiente manera:

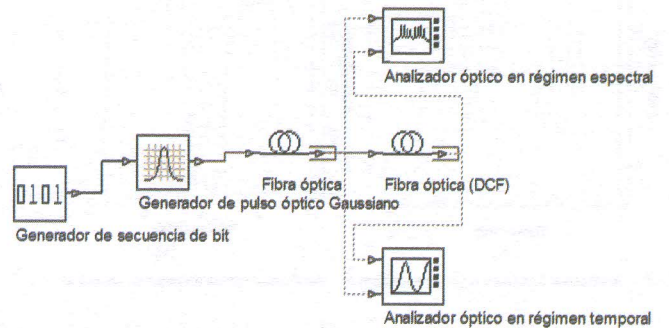


Fig. 12. Diagrama de simulación utilizando fibra DFC.

En la Fig. 12 se puede observar un segundo bloque de fibra óptica, esta corresponde a una fibra DCF el mismo que se configuró con un elevado coeficiente de dispersión de signo contrario y de una longitud inferior a la de la fibra de transmisión. En estas condiciones, una vez realizada la compensación, la señal resultante es la siguiente:

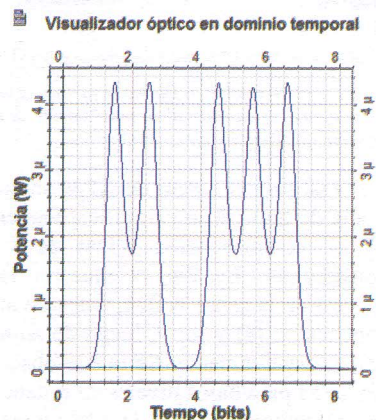


Fig. 13 Señal temporal resultante luego de aplicar el mecanismo remedial con fibra DCF.

Como se puede observar en la Fig.13 la señal luego de la compensación DCF se ha recuperado en su totalidad. Sin embargo este mecanismo remedial es efectivo cuando existe únicamente dispersión en el régimen temporal, puesto que cuando el valor de  $\varphi_{max}$  sea superior a  $0.5\pi$ , obligatoriamente se deberá reducir la potencia de transmisión en primera instancia.

### B. Mecanismos remediales para XPM

El primer mecanismo remedial, consiste en disminuir la potencia de transmisión cuando el valor de  $\varphi_{max}$  es elevado.

En todos los casos, cuanto menor es la separación entre canales WDM mayor es el impacto de XPM. Es por eso que otro mecanismo remedial propuesto es la combinación de: aumento de separación entre canales ópticos WDM y el uso de una fibra DCF.

Para analizar la efectividad de este mecanismo, se considera el mismo sistema WDM de 5 canales ópticos con el que se trabajó en la Fig. 9(b) y 9(d) donde la afectación por XPM era significativa. Luego de aumentar la separación entre canales, en la Fig.14(b) se ilustra el efecto de este mecanismo remedial en el régimen espectral, donde se observa que al tener una separación mayor entre canales, el ensanchamiento espectral producido por los efectos no lineales en un canal no afecta a los canales aledaños. Adicionalmente, se ha incluido también la forma de la señal correspondiente al canal central en el régimen temporal para observar el efecto de este mecanismo remedial a nivel de bits, Fig.14(a).

Se puede observar en la Fig. 14 que tanto la forma temporal como el espectro de la señal han mejorado y, en estas condiciones ya es posible su recuperación. De esta manera se comprueba la efectividad de este mecanismo remedial.

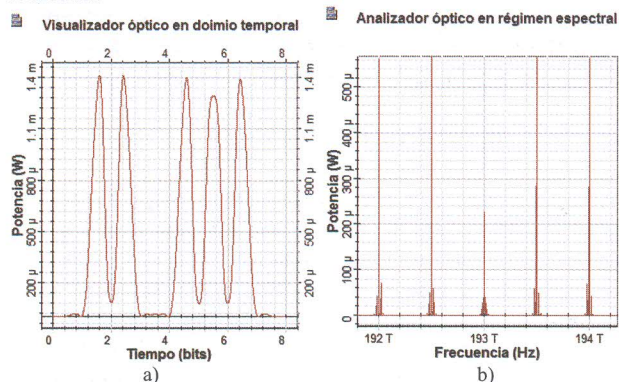


Fig. 14. a) Forma temporal de la señal al aplicar el mecanismo remedial, b) Espectro de la señal al aplicar el mecanismo remedial

## VIII. CONCLUSIONES

- Para determinar si los efectos no lineales de modulación de fase son de consideración, se debe tomar en cuenta algunos parámetros que ayudan a cuantificar el impacto de estos fenómenos indeseables; por ejemplo, la distancia no lineal  $L_{NL}$ ,  $\varphi_{m\acute{a}x}$ , relación temporal  $\frac{T_L}{T_0}$ , longitud de dispersión  $L_D$ .
- En el caso de presentarse efectos no lineales SPM y XPM significativos y dependiendo de los parámetros de

transmisión del sistema de comunicación óptico, se puede adoptar uno de los mecanismos remediales sugeridos en este trabajo, y así conseguir atenuar la afectación de estos fenómenos en la calidad de la transmisión.

- La relación  $\frac{T_L}{T_0}$ , como se ha visto, es uno de los mejores indicadores de cómo el pulso óptico va a evolucionar temporalmente a medida que viaja a través de la fibra. Este mismo parámetro ayuda a determinar cómo implementar el mecanismo remedial correspondiente, debido a que esta curva indica cómo y en qué condiciones se comprime el pulso, lo cual puede ser aprovechado para contrarrestar el impacto de GVD.
- Existe un rango de potencia máximo con el que es posible mitigar los efectos de SPM y XPM, el mismo que está limitado por la curva  $\frac{T_L}{T_0}$  y por el valor de  $\varphi_{m\acute{a}x}$ , parámetros que están directamente relacionados con la potencia de transmisión inicial como se observó en (7) y (8).
- En la tabla I se puede observar que al aumentar la potencia de transmisión, la distancia máxima a la que se puede transmitir antes de que el valor de  $\frac{T_L}{T_0}$  supere la unidad también aumenta, lo cual puede ser aprovechado en un sistema de comunicación que requiera cubrir mayores alcances de transmisión, como es el caso de las redes long haul o ultra long haul.

## REFERENCIAS

- [1] Govind P. (2013), *Agrawal Nonlinear Fiber Optics*. New York. USA: Academic Press Elsevier.
- [2] Rajiv Ramaswami, Kumar N. y Sivarajan, Galen H. Sasaki. (2010) *Optical Networks a practical perspective*. Miami, usa: elsevier.
- [3] Ing. Carrera Salazar Carlos Andrés. (2013). Estudio y simulación del efecto no lineal auto modulación de fase. Proyecto de Titulación. EPN.
- [4] Wayne Tomasi. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónica*, Arizona, USA.
- [5] Fideromeo Savaedra G, Álvaro Lamas N., Marco Fernández B., Yonatan Cepeda P. (2005). Efectos de la modulación de fase cruzada sobre la propagación de ondas en fibra óptica. Obtenido de: <http://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v13n3/art10>
- [6] ITU-T G653 (07/2010), Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fiber and cable.
- [7] ITU-T G655 (11/2009), Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fiber and cable.
- [8] Ing. Rubio Mena Adrián. (2017). Análisis y simulación de los efectos no lineales de modulación de fase en fibras G.653 y G.655 y su relación con los parámetros de transmisión. Proyecto de Titulación. EPN.



**María Soledad Jiménez Jiménez**, Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional. Master of Science in Electrical Engineering, Universidad de Texas & Arlington – USA. Docente a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. Su campo de interés son las Comunicaciones Ópticas.



**Adrian Rubio Mena**, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Se desempeña como Ingeniero de NOC en la empresa Transnexa desde el año 2016 hasta la actualidad.