

Estudio y Simulación del Efecto No Lineal Automodulación de Fase en Fibras Ópticas Monomodo

Carrera A. *; Jiménez M.S.**

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Quito, Ecuador (Tel: 593-9-6878281; e-mail: charles.carrera@hotmail.com)

**Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2507144 ext. 2335; e-mail: maria.jimenez@epn.edu.ec)

Resumen: Dado los beneficios que ofrece la transmisión por fibra óptica monomodo (largas distancias y altas velocidades de transmisión), es necesario realizar estudios minuciosos sobre los fenómenos que se producen en esta fibra óptica durante la transmisión de la información y que afectan la calidad de la misma. En este trabajo se estudia el efecto no lineal de "Automodulación de Fase" desde una perspectiva teórica y mediante simulación. Este efecto depende de varios factores como son: la potencia de transmisión, el parámetro no lineal, el área efectiva de la fibra óptica, la longitud del enlace de fibra y la longitud efectiva de la fibra óptica; este estudio se lo realiza para diferentes tipos de fibra óptica monomodo: SSMF (Standard Single Mode Fiber), DSF (Dispersion Shifted Fiber) y NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber).

Palabras clave: Automodulación de Fase, Fenómenos no Lineales, Longitud no Lineal, Longitud Efectiva, Potencia Óptica, Área Efectiva.

Abstract: Due to the benefits that the transmission by a single mode optical fiber (long distances and high speeds of transmission) offers, it is necessary to carry out through research about the phenomena that occurs in such optical fiber during the information transmission that affect its quality. The nonlinear effect of "Self-Phase Modulation" is studied. This effect depends on several parameters such as: The optical transmission power, the nonlinear parameter, the effective area of the fiber, the length of the optical fiber and its effective length. This study is carried out for different types of single mode optical fiber: SSMF (Standard Single Mode Fiber), DSF (Dispersion Shifted Fiber) and NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber).

Keywords: Self-Phase Modulation, Nonlinear Phenomena, Nonlinear Length, Effective Length, Optical Power, Effective Area.

1. INTRODUCCIÓN

El efecto no lineal Automodulación de fase (SPM, *Self-Phase Modulation*) se presenta en la transmisión por fibra óptica monomodo por la presencia de una componente no lineal en el índice de refracción, así como por la dependencia que ésta tiene con la intensidad de los pulsos transmitidos, haciendo que los pulsos que se propagan por una fibra óptica debido a este fenómeno se ensanchen.

2. DISPERSIÓN CROMÁTICA

Una de las causas de dispersión cromática en una fibra óptica se debe a que diferentes componentes espectrales asociadas a un pulso viajan con diferentes velocidades.

En los sistemas de comunicaciones el efecto de la dispersión cromática es perjudicial puesto que produce ensanchamiento en los pulsos, lo que a la postre genera interferencia entre los pulsos ópticos transmitidos.

Matemáticamente los efectos de la dispersión cromática se los puede explicar mediante la constante de propagación β utilizando la serie de Taylor sobre la frecuencia central del pulso: [6]

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1)$$

Los parámetros β_1 y β_2 están relacionados al índice de refracción y sus derivadas a través de las siguientes ecuaciones: [5] [6]

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (2)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \quad (3)$$

n : Índice de refracción de grupo

v_g : Velocidad de grupo

La envolvente del pulso óptico se mueve a la velocidad de grupo, mientras que el parámetro β_2 representa la dispersión de la velocidad de grupo y es el responsable del ensanchamiento del pulso, este fenómeno se conoce como

Dispersión de Velocidad de Grupo GVD (Group Velocity Dispersion).

Cuando la transmisión se realiza cerca de la longitud de onda de corte aparece un nuevo término denominado coeficiente de dispersión de tercer orden, *TOD (Third Order Dispersion)*, y se lo representa con el parámetro β_3 . Para incluir este parámetro dentro del análisis de SPM se debe tener en cuenta que la transmisión se la debe realizar a pocos nanómetros de separación de la longitud de onda de corte (aproximadamente 10nm).

3. AUTOMODULACIÓN DE FASE (SPM)

El origen de los efectos no lineales [7] está en la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la intensidad de los pulsos transmitidos. Este efecto se conoce como efecto Kerr Óptico, el que establece que el índice de refracción obedece la ecuación: [1] [3] [4]

$$n(I, \omega) = n_0 + n_2 I \tag{4}$$

Donde:

- ω : Frecuencia central del pulso transmitido
- n_0 : Índice de refracción lineal
- n_2 : Índice de refracción no lineal
- I : Intensidad de los pulsos transmitidos

Como consecuencia del efecto Kerr óptico, un pulso con potencia $P(t)$ que se propaga a través de una fibra óptica de longitud L ensancha su espectro una cantidad $\Delta\omega$ dada por la siguiente expresión matemática: [5] [10]

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP(t)}{dt} \tag{5}$$

Donde γ es el llamado “coeficiente no lineal” expresado de la siguiente manera: [5] [10]

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega_0}{A_{eff} \cdot c} \tag{6}$$

En la ecuación (6) se observa que la no linealidad de la fibra óptica depende de la frecuencia con la que se transmiten los pulsos, del área efectiva A_{eff} (parámetro que varía según cada tipo de fibra óptica monomodo) y del índice de refracción no lineal (en fibras típicas utilizadas en sistemas de comunicaciones el valor del parámetro no lineal suele estar entre 1,2 y 2 (W Km)⁻¹). [7]

De acuerdo a (6), el área efectiva es un factor determinante para incrementar o disminuir la no linealidad de la fibra óptica; mientras mayor es el área efectiva de la fibra óptica, menor serán los efectos de SPM. La fibra óptica monomodo SSMF (*Standard Single Mode Fiber*) es la que mejor respuesta presenta ante SPM puesto que tiene mayor área efectiva, aunque hoy en día existen fibras ópticas monomodo NZ-DSF (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber*) de gran área efectiva que tienen valores elevados en dicho parámetro.

En la Fig. 1 se puede observar los valores típicos de área efectiva en fibras ópticas monomodo DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) y NZ-DSF:

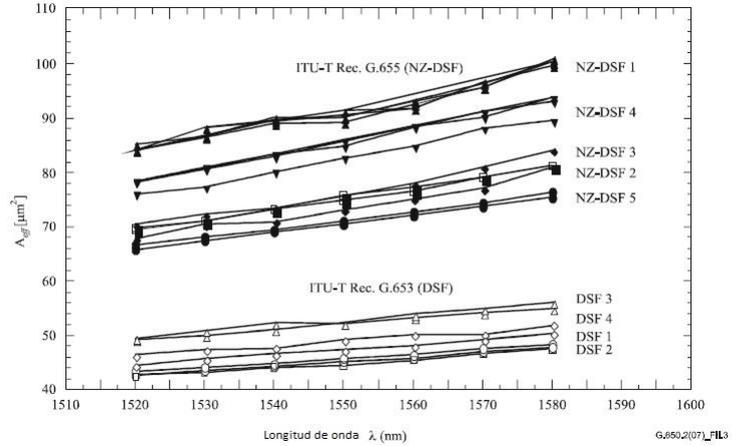


Figura 1. Áreas efectivas en fibras DSF y NZ-DSF

3.1 Longitudes Características de la Fibra Óptica

Para determinar el efecto que SPM tiene en la transmisión, se debe analizar las longitudes características de la fibra óptica, las cuales se detallan a continuación:

- Longitud efectiva
- Longitud de dispersión
- Longitud no lineal

Longitud efectiva.- Se considera como la distancia dentro de la cual los efectos no lineales son considerables. Se la expresa de la siguiente manera: [7]

$$L_{eff} = \frac{(1 - e^{-\alpha L})}{\alpha} \tag{7}$$

Esta longitud depende del coeficiente de atenuación de la fibra α (parámetro determinado en las Recomendaciones de la Serie G de la UIT) y de la longitud de la fibra óptica L . Mientras mayor es la longitud de la fibra óptica, mayor es su longitud efectiva.

Longitud de dispersión.- Esta longitud está relacionada con la dispersión cromática mediante el coeficiente de dispersión de segundo orden β_2 y el ancho inicial del pulso óptico T_0 , de acuerdo a la siguiente ecuación: [6] [8]

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \tag{8}$$

La longitud de dispersión indica a partir de qué distancia los efectos dispersivos son importantes.

Longitud no lineal.- Esta longitud indica a partir de qué distancia los efectos no lineales son importantes. Esta longitud relaciona el coeficiente no lineal γ y la potencia óptica emitida por la fuente de luz P_0 , de la forma: [6] [8]

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (9)$$

Mientras mayor sea la potencia de transmisión P_0 , esta longitud a la que se presentan los efectos no lineales disminuye.

Para que los efectos de SPM interfieran en la transmisión se debe cumplir la siguiente condición: [6]

$$\frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \gg 1 \quad (10)$$

3.2 Ensanchamiento Producido por SPM

El desfase que se produce en los pulsos ópticos debido a SPM se lo puede calcular utilizando la expresión: [3]

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \gamma P_0 L_{eff} \quad (11)$$

Dicho desfase depende del parámetro no lineal, de la longitud efectiva puesto que como se mencionó, ésta determina hasta qué distancia los efectos no lineales son importantes; y, de la potencia óptica emitida por la fuente de luz.

La ecuación (11) permite conocer el desfase de los pulsos. Sin embargo, existe otro parámetro que determina el ensanchamiento de los pulsos ópticos, éste es: [3] [6]

$$\delta\omega_{max} = 0.86 T_0^{-1} \varphi_{max} \quad (12)$$

El ensanchamiento de los pulsos ópticos depende del ancho espectral inicial (relacionado de manera inversa con el ancho inicial del pulso) y del desfase producido por SPM.

En la siguiente figura se observa los diversos tipos de ensanchamientos y degradaciones de los pulsos producidos por SPM para diferentes escenarios en función del desfase:

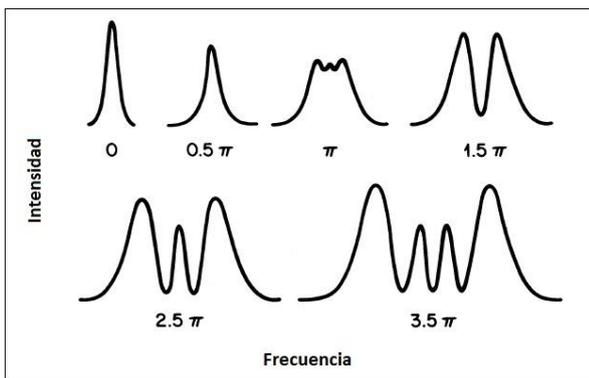


Figura 2. Formas de los pulsos con varios desfases

Cuando la potencia óptica se incrementa, los efectos no lineales aumentan provocando que en este caso Automodulación de Fase y se incrementen armónicos de frecuencia en los bordes del pulso óptico.

4. ANÁLISIS TEÓRICO Y SIMULACIÓN DE SPM

Una vez que se han descrito los parámetros que intervienen en el análisis de la automodulación de fase, a continuación se estudia una serie de casos a fin de observar el comportamiento de SPM, para ello se utilizan tres tipos de fibras ópticas monomodo (SSMF-G652, DSF-G653 y NZ-DSF-G655) y se varían los parámetros de longitud de fibra óptica, potencia óptica y velocidad de transmisión.

Para el análisis de cada caso se utiliza el software computacional NLSE Solver. Este programa está basado en la ecuación no lineal de Schrödinger, que involucra los parámetros indicados anteriormente. A continuación se indica dicha ecuación: [2] [11]

$$\frac{\partial A(t,z)}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(t,z)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{2} \frac{\partial^3 A(t,z)}{\partial t^3} - \frac{\alpha}{2} A(t,z) + i\gamma \left[|A(t,z)|^2 A(t,z) + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_R \frac{\partial(|A|^2)}{\partial t} A \right] \quad (13)$$

En esta ecuación intervienen los parámetros ópticos: coeficiente de atenuación, coeficientes de dispersión cromática de segundo y tercer orden y potencia de transmisión.

En la Fig. 3 se presenta la interfaz gráfica del software computacional NLSE Solver, con sus correspondientes secciones y los diferentes parámetros que deben ser ingresados.

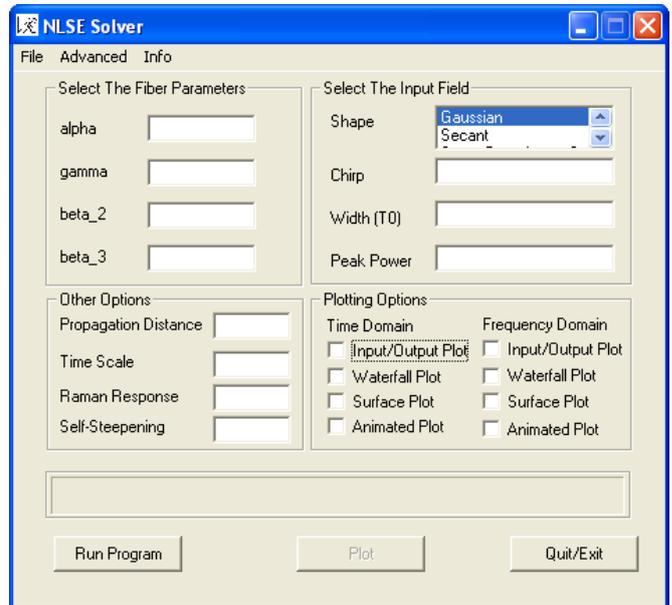


Figura 3. Interfaz gráfica del software NLSE Solver

4.1 SPM en una fibra óptica monomodo SSMF

En este grupo de casos se utiliza como medio de transmisión la fibra óptica monomodo SMF-28, cuya área efectiva es 84 um^2 y cuyo coeficiente de atenuación según la norma G652 es 0.2 dB/Km en segunda ventana (1310 nm), que es donde se utiliza preferentemente. Para determinar la no linealidad de la fibra es necesario calcular el valor del parámetro no lineal, para ello se requiere determinar los siguientes valores:

- El índice de refracción no lineal (n_2): Parámetro que depende del tipo de fibra óptica y para la fibra SSMF es $1,8 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2$.
- La frecuencia central del pulso, parámetro que depende exclusivamente de la longitud de onda de trabajo (1310nm).

Mediante la siguiente expresión se obtiene el valor de la frecuencia central:

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{2\pi(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{1310 \times 10^{-9} \text{ m}} = 458\pi \quad (14)$$

Para cada uno de los casos de estudio se variará la longitud de la fibra, en tanto que el valor del coeficiente no lineal se considerará constante, y se lo determina de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff} C} = \frac{(1,8 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2)(458\pi \text{ THz})}{(84 \times 10^{-11} \text{ m}^2)(3 \times 10^8 \text{ m/s})} = 1,21 \frac{1}{\text{KmW}} \quad (15)$$

A continuación se indica los parámetros variables que se utilizan para las simulaciones:

Caso I ($L=30\text{Km}$):

En cada caso se debe expresar el coeficiente de atenuación (dB/Km) en unidades lineales (α') en lugar de logarítmicas.

$$\alpha' = (0,23) \times (0,2 \text{ dB/Km}) = 0,046 \text{ Km}^{-1} \quad (16)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0,046)(30)}}{0,046} = 16,27 \text{ Km} \quad (17)$$

Caso II ($L=70\text{Km}$):

$$\alpha' = (0,23) \times (0,2 \text{ dB/Km}) = 0,046 \text{ Km}^{-1} \quad (18)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0,046)(70)}}{0,046} = 20,87 \text{ Km} \quad (19)$$

Caso III ($L=200\text{Km}$):

$$\alpha' = (0,23) \times (0,2 \text{ dB/Km}) = 0,046 \text{ Km}^{-1} \quad (20)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0,046)(200)}}{0,046} = 21,73 \text{ Km} \quad (21)$$

Para conocer el efecto de SPM en la transmisión se debe determinar el valor de la longitud no lineal, para ello se debe definir la potencia con la cual se envían los pulsos ópticos. Las potencias que se consideran son 2mW y 20mW, así:

Caso a)Potencia de entrada 2 mW

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1,21 \text{ Km}^{-1})(2 \times 10^{-3} \text{ W})} = 413,22 \text{ Km} \quad (22)$$

A continuación se realiza el análisis para el CASO I ($L = 30 \text{ Km}$):

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16,27 \text{ Km}}{413,32 \text{ Km}} = 0,039 \quad (23)$$

En la ecuación(12) se observa que el ensanchamiento depende del desfase y del ancho inicial del pulso óptico (inverso de la velocidad de transmisión, Vt), para este caso y considerando una velocidad de transmisión de 10 Gbps, el valor sería:

$$T_0 = \frac{1}{(10 \times 10^9 \text{ bps})} = 100 \text{ ps} \quad (24)$$

Por lo tanto el ensanchamiento provocado por SPM es:

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,039)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 0,11 \text{ ps} \approx 0 \quad (25)$$

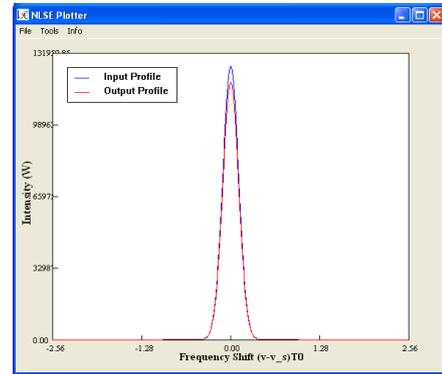


Figura 4. Pulso óptico en fibra SSMF sin afectación debido a SPM ($P_0=2\text{mW}$, $Vt=10\text{Gbps}$ y $L=30 \text{ Km}$)

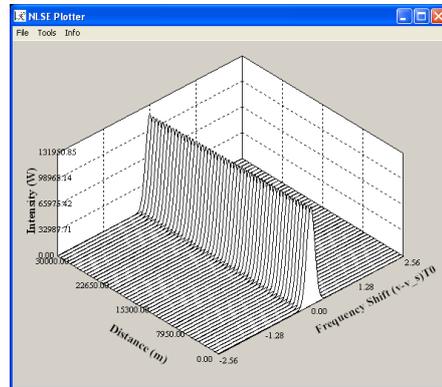


Figura 5. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica SSMF ($P_0=2\text{mW}$, $Vt=10\text{Gbps}$, y $L=30 \text{ Km}$)

Si se compara el resultado teórico de (25) con las gráficas de la Fig. 2, se observa que SPM no degrada en este caso los pulsos ópticos, como se puede corroborar con los resultados de la simulación presentados en las Figs. 4 y 5, donde se observa que no hay afectación en la forma de los pulsos; pues si la potencia óptica es pequeña (2 mW) no se alcanzan a producir los efectos no lineales, por tanto SPM no tiene efecto en la transmisión.

Caso b)Potencia de entrada 20 mW

A continuación con una potencia aplicada superior se analiza para la misma fibra SSMF el CASO I ($L = 30 \text{ Km}$), considerando la misma velocidad de transmisión. En este

caso se puede observar cómo SPM si tiene efecto en la transmisión, esto ocurre debido a que la potencia óptica es grande (20 mW) y se alcanzan a producir los efectos no lineales.

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1,21 \text{ Km}^{-1})(20 \times 10^{-3} \text{ W})} = 41,32 \text{ Km} \quad (26)$$

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16,27 \text{ Km}}{41,32 \text{ Km}} = 0,39 \quad (27)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,39)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 1,1\pi \cong \pi \quad (28)$$

Las Figs. 6 y 7 que se presentan a continuación, muestran la afectación debida a SPM en la forma del pulso.

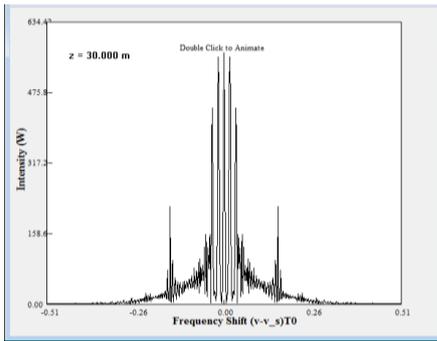


Figura 6. Pulso óptico en fibra SSMF con afectación debido a SPM ($P_0=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=30\text{ Km}$)

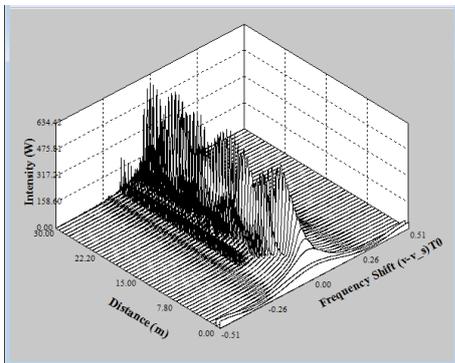


Figura 7. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra óptica SSMF ($P_0=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=30\text{ Km}$)

Para observar la variación del efecto de automodulación de fase se incrementará la longitud de la fibra óptica, puesto que al aumentar este valor, los efectos no lineales también aumentan. Las longitudes que se utilizarán son 70Km y 200Km.

Los resultados que se obtienen en el análisis, para el CASO II, cuando la longitud de la fibra óptica es 70Km y la potencia óptica $P_0=2\text{mW}$, manteniendo la misma fibra SSMF e igual velocidad de transmisión de 10 Gbps, son los siguientes:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20,87 \text{ Km}}{413,32 \text{ Km}} = 0,051 \quad (29)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,051)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 0,14\pi \cong 0 \quad (30)$$

A continuación se presentan los resultados arrojados por la simulación para este caso.

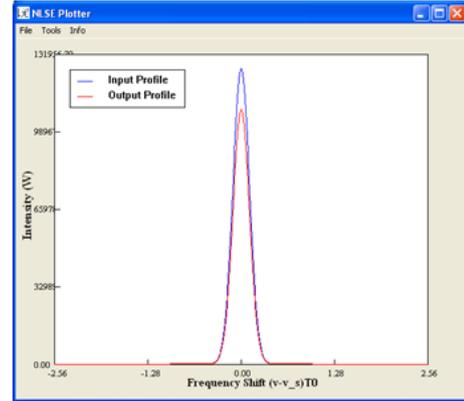


Figura 8. Pulso óptico en fibra SSMF sin afectación debido a SPM ($P_0=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{ Km}$)

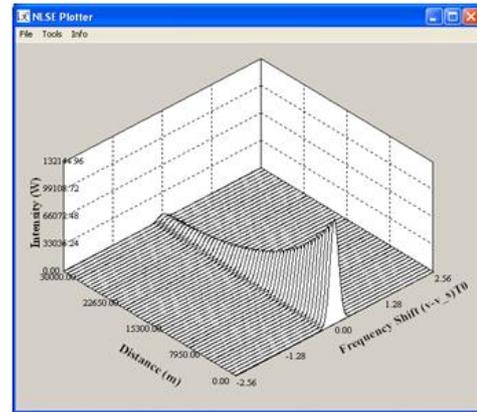


Figura 9. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica SSMF ($P_0=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{ Km}$)

Estos resultados (Figs. 8 y 9), muestran que no hay degradación en los pulsos, esto se debe a la baja potencia aplicada (2mW) y a la menor velocidad de transmisión (10Gbps).

Si se incrementa la velocidad de transmisión a 40 Gbps a fin de analizar su efecto en el ensanchamiento de los pulsos, de acuerdo a (23), T_0 sería 25 ps, en este caso se tendría:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20,87 \text{ Km}}{413,32 \text{ Km}} = 0,051 \quad (31)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,051)(25 \times 10^{-12})^{-1} = 0,52\pi \cong 0,5\pi \quad (32)$$

Para las mismas condiciones de longitud y potencia aplicada, con un incremento en la velocidad de transmisión a 40 Gbps ya se observa afectación en los pulsos, esto demuestran tanto los resultados teóricos como los que arroja la simulación (Figs. 10 y 11).

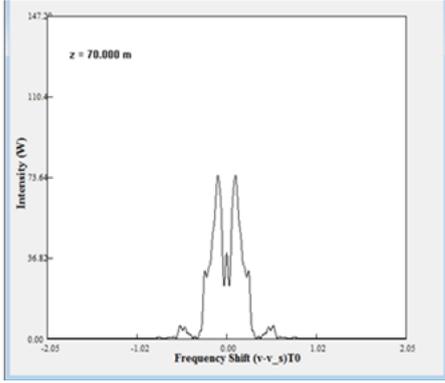


Figura 10. Pulso óptico en fibra SSMF con afectación debido a SPM ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=40\text{Gbps}$ y $L=70\text{ Km}$)

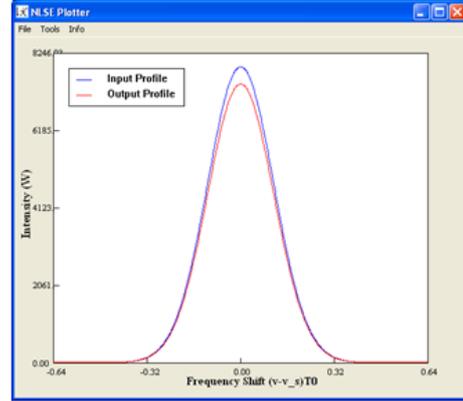


Figura 11. Pulso óptico en fibra SSMF sin afectación debido a SPM ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{ Km}$)

Se realiza el mismo análisis para el CASO III, cuando la longitud de la fibra se incrementa a $L=200\text{ Km}$, la potencia óptica $P_o=2\text{ mW}$, manteniendo la misma fibra SSMF y una velocidad de transmisión de 10 Gbps . Los resultados son:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21,73\text{Km}}{413,32\text{Km}} = 0,052(33)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,052)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 0,15\pi \cong 0 \quad (34)$$

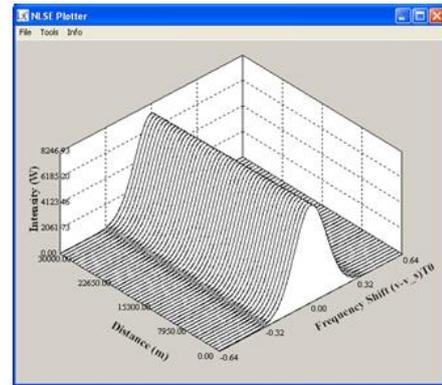


Figura 12. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica SSMF ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{ Km}$)

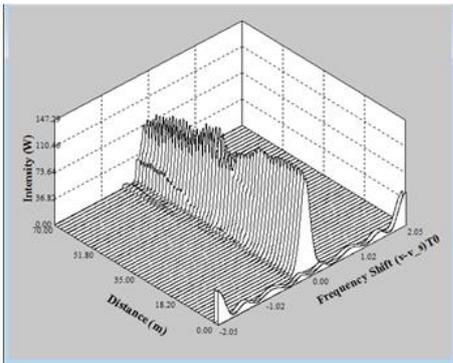


Figura 13. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra SSMF ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=40\text{Gbps}$ y $L=70\text{ Km}$)

Dada la baja potencia aplicada (2 mW), en condiciones de una velocidad de transmisión de 10 Gbps , no se observa degradación de los pulsos, esto se deduce tanto de los resultados teóricos como los de la simulación (Figs. 12 y 13).

A continuación, manteniendo una velocidad de 10 Gbps y la misma longitud de fibra (200 Km), se procede a incrementar la potencia óptica a 20 mW , para analizar si hay o no afectación en la forma de los pulsos.

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21,73\text{Km}}{41,32\text{Km}} = 0,52 \quad (35)$$

$$\delta\omega_{max} = 0,86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0,86(0,52)(100 \times 10^{-12})^{-1} = 1,5\pi \quad (36)$$

De lo que se observa, a una velocidad de 10 Gbps , con una potencia incrementada de 20 mW y una longitud de fibra de 200 Km , ya se presenta degradación en los pulsos, como lo muestran los resultados teóricos y los que se obtienen de la simulación (Figs. 14 y 15).

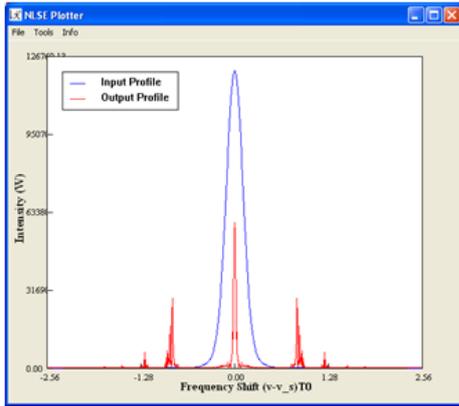


Figura 14. Pulso óptico en fibra SSMF con afectación debido a SPM ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{Km}$)

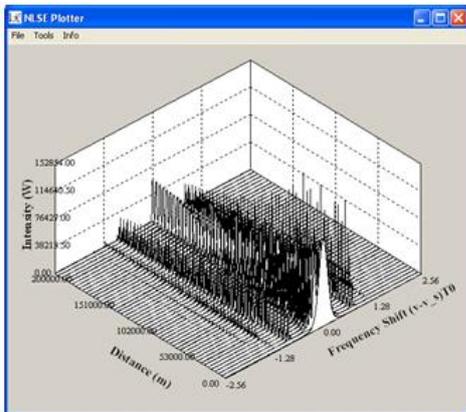


Figura 15. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra óptica SSMF ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{Km}$)

4.2 SPM en una fibra óptica monomodo DSF

Se realiza un análisis similar al mostrado en la sección anterior con la única diferencia de que ahora la fibra óptica monomodo es del tipo DSF. Se utilizará la fibra óptica DSF según la Recomendación G.653A.

Para las fibras DSF el valor del índice de refracción no lineal es $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$. La frecuencia central del pulso óptico está relacionada a la longitud de onda de trabajo, las fibras DSF normalmente operan en tercera ventana, es decir 1550nm , por lo que la frecuencia central del pulso óptico es:

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{2\pi(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{1550 \times 10^{-9} \text{ m}} = 378\pi \quad (37)$$

Según la norma G653A el área efectiva de una fibra DSF es aproximadamente $55\mu\text{m}^2$, su coeficiente de atenuación de 0.35 dB/Km ; y, el índice de refracción no lineal es $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$. Por tanto, el valor del coeficiente no lineal correspondiente es:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{\text{eff}} C} = \frac{(3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W})(378\pi \text{ THz})}{(55 \times 10^{-11} \text{ m}^2)(3 \times 10^8 \text{ m/s})} = 1.4 \frac{1}{\text{KmW}} \quad (38)$$

Se observa que el valor del coeficiente no lineal es mayor, esto se debe a que el área efectiva de las fibras DSF es menor que la de las fibras SSMF.

A continuación se indican los valores de longitud efectiva obtenidos aplicando (7) y (16), para cada uno de los casos de fibra DSF:

Tabla 1: Longitud efectiva, L_{eff} , para fibra DSF

Longitud/Parámetro	L=30 Km	L=70Km	L=200Km
α'	0.0805Km^{-1}	0.0805Km^{-1}	0.0805Km^{-1}
L_{eff}	11.31 Km	12.37Km	12.42 Km

Conociendo las longitudes efectivas, se debe calcular las longitudes no lineales mediante (9). Para fines de comparación, las potencias consideradas son iguales a las utilizadas en el caso de la fibra óptica SSMF y los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Longitud no lineal, L_{NL} , para fibra DSF con diferentes Potencias de entrada

$L_{\text{NL}}/\text{Potencia } (P_o)$	L_{NL}
$P_o = 2\text{mW}$	333.33 Km
$P_o = 20 \text{ mW}$	33.33 Km

Similar a lo señalado con la fibra óptica monomodo SSMF, se analizará un caso cuando SPM afecta a los pulsos ópticos y otro cuando se descarta la presencia de este efecto. Para poder realizar una comparación tanto gráfica como matemática, este análisis se lo realiza bajo las mismas condiciones de la fibra estándar.

En la Tabla 3, se presentan los diferentes escenarios de fibra DSF para los que se analizó el efecto de SPM, determinando los parámetros de desfase y ensanchamiento de los pulsos mediante (11) y (12) respectivamente, en condiciones de una velocidad de transmisión constante de 10 Gbps .

Tabla 3: Análisis teórico de SPM para una fibra DSF a $V_t = 10 \text{ Gbps}$, variando P_o y L

P_o/L	$P_o = 2\text{mW}$	$P_o = 20 \text{ mW}$
L = 30 Km	$\phi_{\text{max}} = 0.033$	$\phi_{\text{max}} = 0.33$
	$\delta\omega_{\text{max}} = 0.16\pi \approx 0$	$\delta\omega_{\text{max}} = 1.6\pi \approx 1.5\pi$
L = 70 Km	$\phi_{\text{max}} = 0.033$	$\phi_{\text{max}} = 0.33$
	$\delta\omega_{\text{max}} = 0.16\pi \approx 0$	$\delta\omega_{\text{max}} = 1.6\pi \approx 1.5\pi$
L = 200 Km	$\phi_{\text{max}} = 0.039$	$\phi_{\text{max}} = 0.39$
	$\delta\omega_{\text{max}} = 0.21\pi \approx 0$	$\delta\omega_{\text{max}} = 2.1\pi \approx 2.\pi$

El análisis teórico (Tabla 3) fue corroborado mediante la correspondiente simulación. Para una fibra DSF de 30 Km , P_o de 2 mW ; y, una velocidad de transmisión de 10 Gbps , los resultados de la simulación (Figs. 16 y 17) muestran que no hay degradación del pulso óptico.

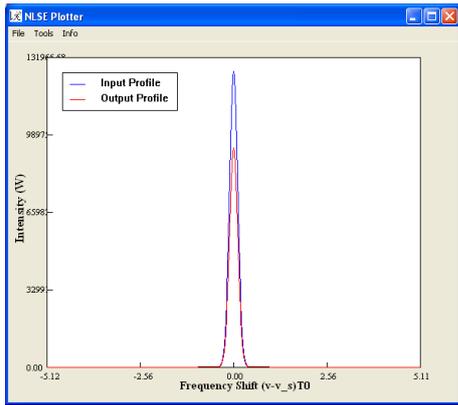


Figura 16. Pulso óptico en fibra DSF sin afectación debido a SPM ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=30\text{Km}$)

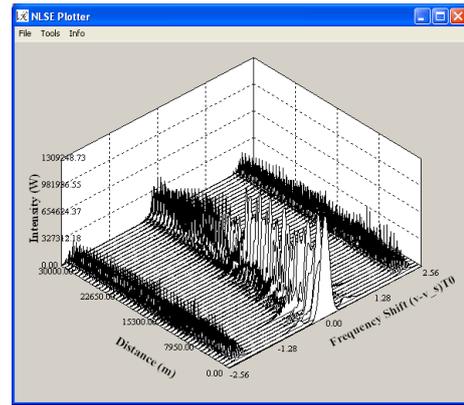


Figura 19. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra DSF ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=30\text{Km}$)

En este caso debido al nivel elevado de potencia (20 mW), los resultados teóricos (Tabla 3), y los de la simulación (Figs. 18 y 19), muestran degradación en los pulsos ópticos.

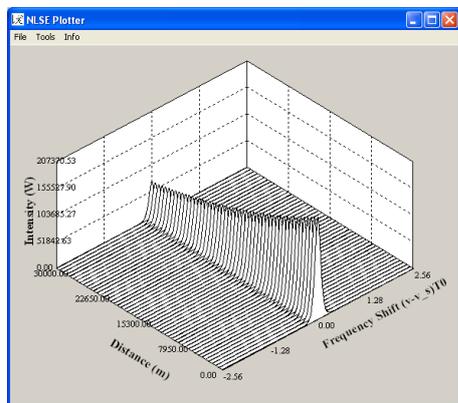


Figura 17. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra óptica DSF ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=30\text{Km}$)

Para la fibra DSF, cuando la potencia de entrada sube a 20 mW, manteniendo las mismas condiciones anteriores ($V_t=10\text{Gbps}$ y $L=30\text{Km}$), los resultados de la simulación son:

Se realizará el mismo análisis aumentando la longitud de la fibra óptica. Cuando la longitud de la fibra se incrementa a 70Km, la potencia de entrada es 2 mW y la velocidad de transmisión 10 Gbps, los resultados de la simulación, Figs. 20 y 21, conjuntamente con los resultados teóricos no muestran degradación en los pulsos ópticos:

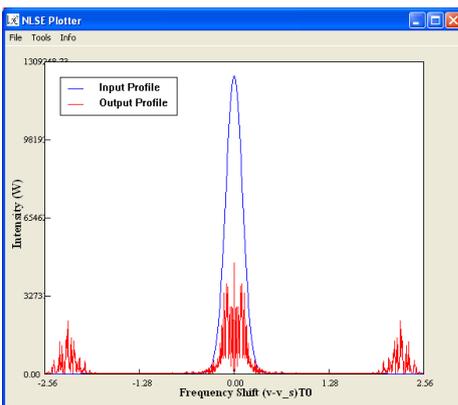


Figura 18. Pulso óptico en fibra óptica DSF con afectación debido a SPM ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=30\text{Km}$)

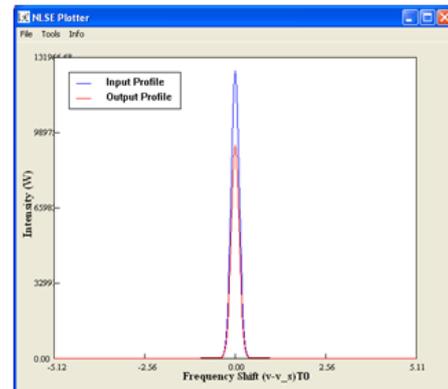


Figura 20. Pulso óptico en fibra DSF sin afectación debido a SPM ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{Km}$)

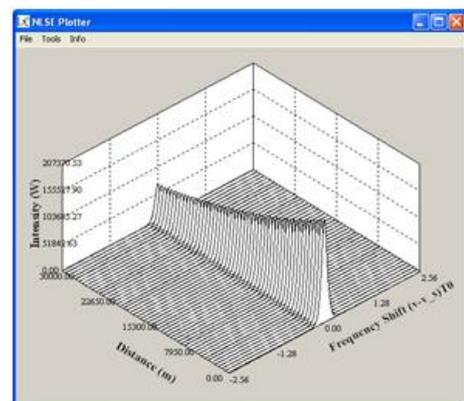


Figura 21. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra DSF ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{Km}$)

Para $L=70$ Km, si la potencia de entrada se aumenta a 20 mW ya se observa degradación en los pulsos (ver Tabla 3 y Figs. 22 y 23):

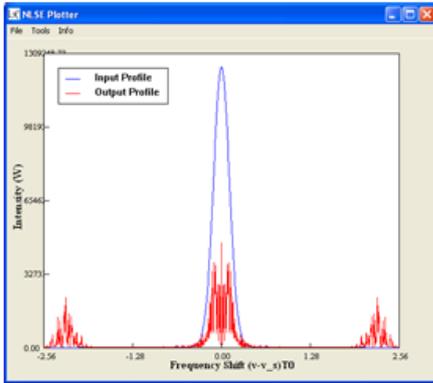


Figura 22. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra DSF ($P_o=2$ mW, $V_t=10$ Gbps y $L=70$ Km)

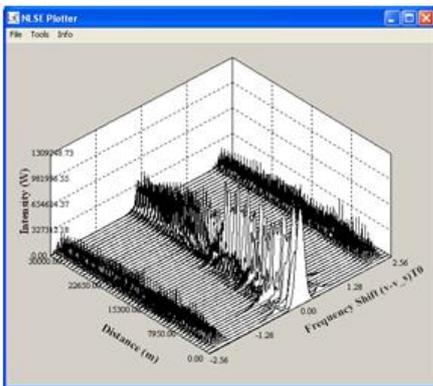


Figura 23. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra DSF ($P_o=20$ mW, $V_t=10$ Gbps y $L=70$ Km)

Cuando la longitud de la fibra es 200Km los resultados a los que se llega, para una potencia de 2 mW y una velocidad de transmisión de 10 Gbps, son los presentados en la tabla 3 y la correspondiente simulación en las Figs. 24 y 25, muestran que no hay degradación en el pulso:

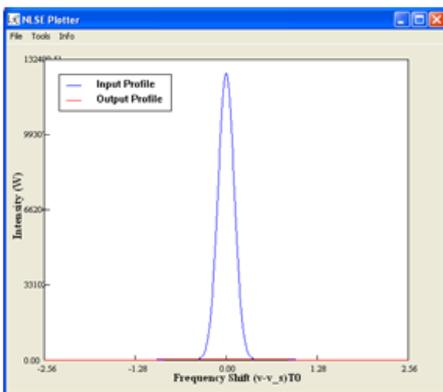


Figura 24. Pulso óptico en fibra DSF sin afectación debido a SPM ($P_o=2$ mW, $V_t=10$ Gbps y $L=200$ Km)

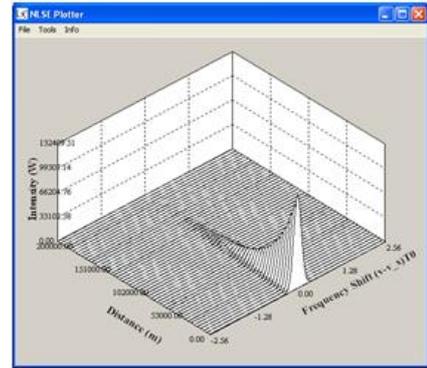


Figura 25. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra DSF ($P_o=2$ mW, $V_t=10$ Gbps y $L=200$ Km)

Con una potencia de 20 mW, e iguales condiciones de longitud ($L=200$ Km) y velocidad ($V_t=10$ Gbps), los resultados teóricos de la Tabla 3 y de la simulación (Figs. 26 y 27), reflejan afectación en la calidad del pulso óptico:

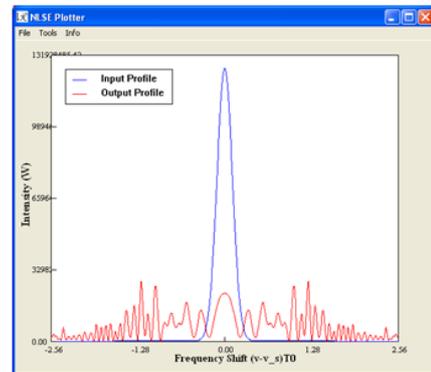


Figura 26. Pulso óptico en fibra óptica DSF con afectación debido a SPM ($P_o=20$ mW, $V_t=10$ Gbps y $L=200$ Km)

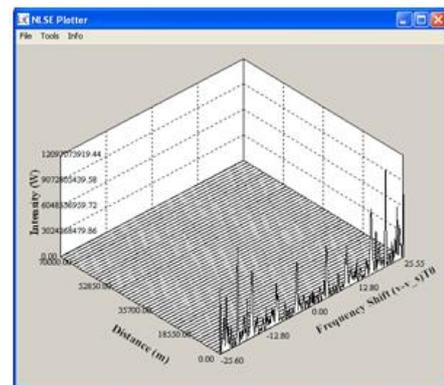


Figura 27. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra DSF ($P_o=20$ mW, $V_t=10$ Gbps y $L=200$ Km)

4.3 SPM en una fibra óptica monomodo NZ-DSF

En este apartado se analiza el efecto que SPM tiene en una fibra óptica monomodo NZ-DSF (Recomendación G.655C), con área efectiva de $72 \mu\text{m}^2$ e índice de refracción no lineal de $2,2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$. La frecuencia central del pulso es la misma calculada en (37), puesto que la longitud de onda de trabajo es también 1550 nm. De modo que el valor del coeficiente no lineal es:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff} c} = \frac{(2,2 \times 10^{-20} m^2/W)(378 \pi THz)}{(7,2 \times 10^{-11} m^2)(3 \times 10^8 m/s)} = 1,3 \frac{1}{KmW} \quad (58)$$

Puesto que la fibra óptica monomodo NZ-DSF tiene el mismo coeficiente de atenuación que la fibra DSF, 0,35 dB/Km, los valores de longitud efectiva son los mismos obtenidos en la Tabla 1. Mientras que las longitudes no lineales difieren dado que el valor del coeficiente no lineal es menor y los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Longitud no lineal para fibra NZ-DSF con diferentes Potencias aplicadas

$L_{NL}/Potencia (P_o)$	L_{NL}
$P_o = 2mW$	400 Km
$P_o = 20 mW$	40 Km

En la Tabla 5, se presentan los diferentes escenarios de fibra NZ-DSF para los que se analizó teóricamente el efecto de SPM, determinando los parámetros de desfase y ensanchamiento de los pulsos mediante (11) y (12) respectivamente, en condiciones de una velocidad de transmisión constante de 10 Gbps.

Tabla 5: Análisis teórico de SPM para una fibra NZ-DSF a $V_t = 10$ Gbps, variando P_o y L

P_o/L	$P_o = 2mW$	$P_o = 20 mW$
$L = 30$ Km	$\varphi_{max} = 0,028$	$\varphi_{max} = 0,28$
	$\delta\omega_{max} = 0,145\pi \approx 0$	$\delta\omega_{max} = 1,45\pi \approx 1,5\pi$
$L = 70$ Km	$\varphi_{max} = 0,031$	$\varphi_{max} = 0,31$
	$\delta\omega_{max} = 0,16\pi \approx 0$	$\delta\omega_{max} = 1,6\pi \approx 1,5\pi$
$L = 200$ Km	$\varphi_{max} = 0,032$	$\varphi_{max} = 0,32$
	$\delta\omega_{max} = 0,19\pi \approx 0$	$\delta\omega_{max} = 1,9\pi \approx 2,\pi$

En primer lugar se indica un ejemplo cuando el efecto de SPM es despreciable en la transmisión, esto ocurre para una longitud de fibra NZ-DSF de 30 Km, una potencia de 2 mW y una velocidad de 10 Gbps. Las respuestas gráficas que se obtienen de la simulación son las siguientes:

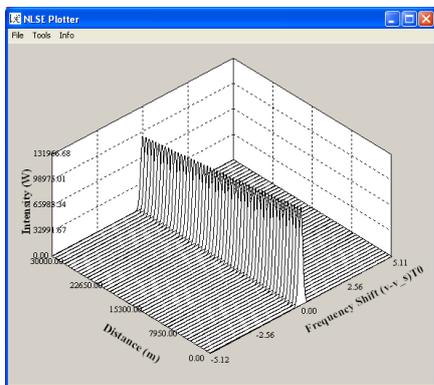


Figura 31. Pulso óptico en fibra NZ-DSF sin afectación debido a SPM ($P_o=2mW$, $V_t=10Gbps$ y $L=30Km$)

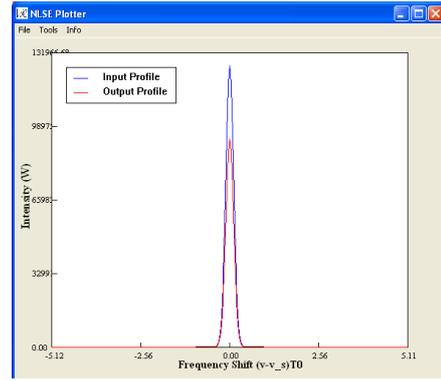


Figura 28. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra NZ-DSF ($P_o=2mW$, $V_t=10Gbps$ y $L=30Km$)

Si la potencia de entrada se incrementa a 20 mW, manteniendo las mismas condiciones anteriores, los resultados obtenidos muestran afectación en la forma del pulso y son los siguientes:

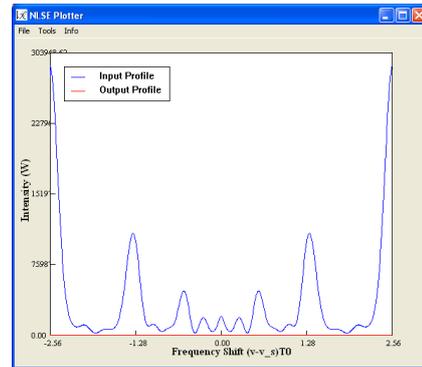


Figura 29. Pulso óptico en fibra NZ-DSF con afectación debido a SPM ($P_o=20mW$, $V_t=10Gbps$ y $L=30Km$)

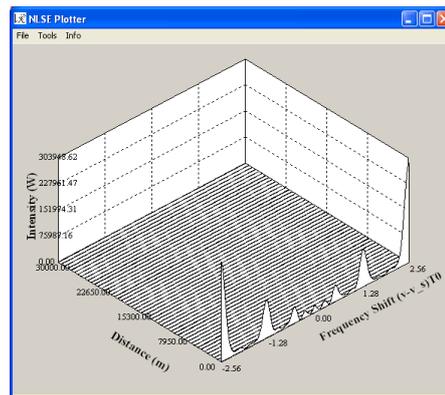


Figura 30. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra NZ-DSF ($P_o=20mW$, $V_t=10Gbps$ y $L=30Km$)

Un análisis similar se realiza para $L=70Km$ y $P_o=2mW$, donde no se presenta degradación en el pulso:

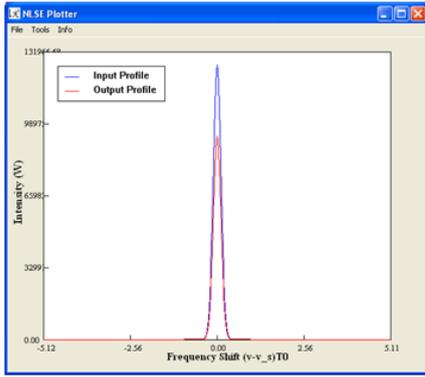


Figura 32. Pulso óptico en fibra NZ-DSF sin afectación debido a SPM ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{Km}$)

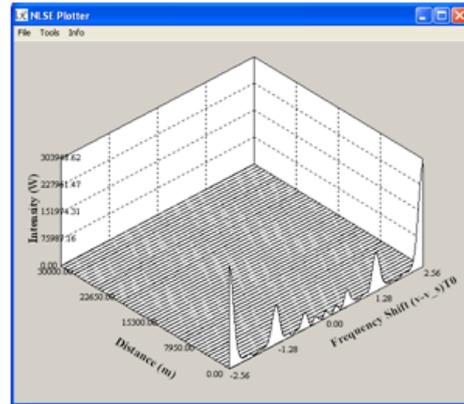


Figura 35. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra NZ-DSF ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{Km}$)

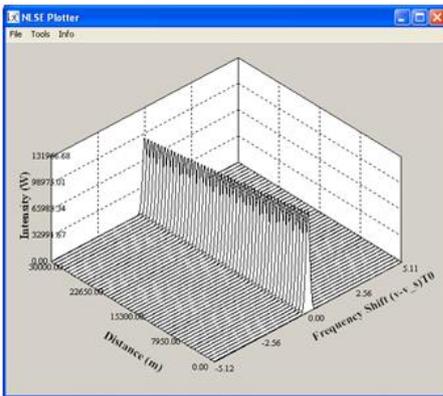


Figura 33. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra NZ-DSF ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{Km}$)

Se procede de manera similar para $L=200\text{Km}$ y $P_o = 2 \text{ mW}$, donde no hay degradación en el pulso:

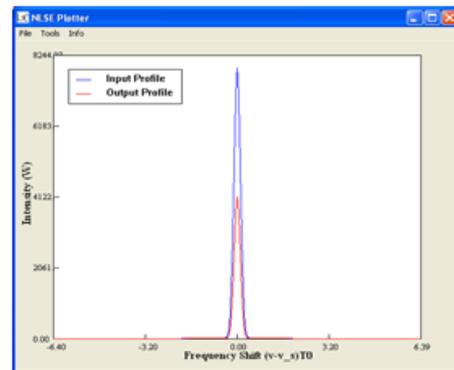


Figura 36. Pulso óptico en fibra NZ-DSF sin afectación debido a SPM ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{Km}$)

Para una potencia de 20 mW con $L = 70 \text{ Km}$, los resultados muestran degradación en el pulso por SPM y son:

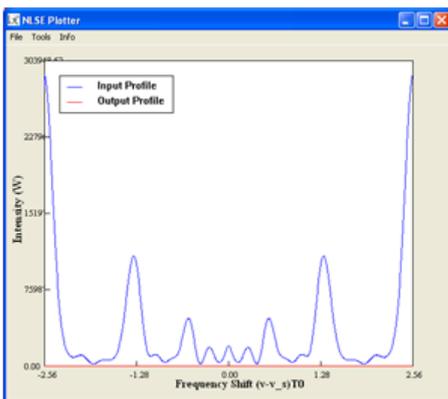


Figura 34. Pulso óptico en fibra NZ-DSF con afectación debido a SPM ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=70\text{Km}$)

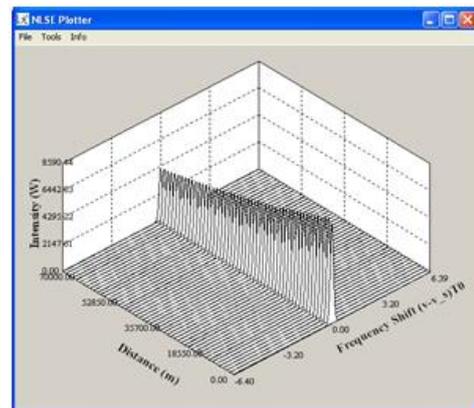


Figura 37. Pulso óptico sin degradación de SPM en fibra NZ-DSF ($P_o=2\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{Km}$)

Para una potencia de 20 mW a la misma longitud los resultados presentan afectación en la forma del pulso y son:

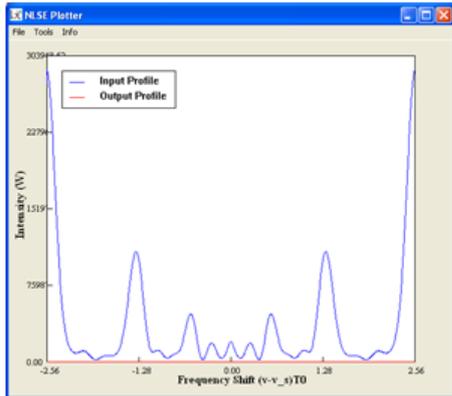


Figura 38. Pulso óptico en fibra NZ-DSF con afectación debido a SPM ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{Km}$)

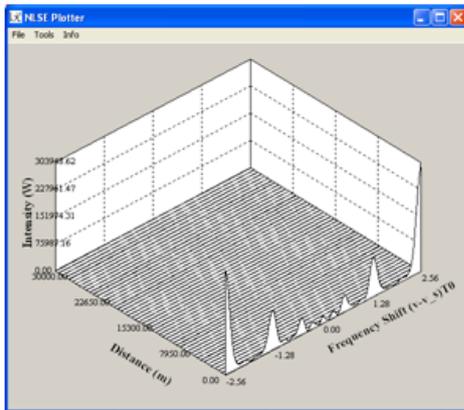


Figura 39. Pulso óptico con degradación de SPM en fibra NZ-DSF ($P_o=20\text{mW}$, $V_t=10\text{Gbps}$ y $L=200\text{Km}$)

En los resultados obtenidos se observa que la fibra óptica monomodo estándar es la que presenta menor afectación por los efectos de SPM; este resultado se debe a que es la fibra que mayor área efectiva tiene. En la actualidad existen fibras ópticas NZ-DSF de gran área efectiva extendida, las cuales mejoran la respuesta ante los efectos de la Automodulación de Fase con respecto a las NZ-DSF de reducida área efectiva.

5. CONCLUSIONES

Los efectos no lineales de automodulación de fase son de consideración cuando se transmite con una potencia superior a los 10 mW, a una potencia inferior sólo se presentan efectos lineales.

La longitud no lineal depende inversamente del coeficiente no lineal (γ) y de la potencia de transmisión, por lo que si se transmite con mayor potencia, la longitud no lineal se reduce y afecta a la transmisión.

Para que se produzca el efecto de SPM se debe cumplir que la longitud de la fibra debe ser mucho menor que la longitud de dispersión y a su vez debe ser aproximadamente igual a la longitud no lineal.

- En el efecto Kerr, el índice de refracción tiene dos componentes, una lineal y otra no lineal. La parte lineal depende exclusivamente del material en el cual se propaga la luz. El segundo componente depende de la intensidad óptica. De ahí parte el origen de SPM y de la dependencia del índice de refracción de la potencia con la que se transmiten los pulsos.
- En el caso del parámetro no lineal, éste depende de muchos factores, entre ellos de la frecuencia central, la cual a su vez depende de la longitud de onda en la que se trabaja; por lo que se concluye que si se trabaja en ventanas de transmisión de menor longitud de onda, este parámetro aumentará haciendo que la longitud no lineal disminuya y se produzca el efecto de SPM con mayor incidencia.
- El diámetro del campo modal es otro factor que interviene en el parámetro no lineal. Si éste es mayor, el parámetro no lineal decrece.
- Cuando la potencia aumenta, la longitud no lineal disminuye, por lo que los efectos de SPM deberán ser tomados en consideración. Si a este efecto se suma una alta velocidad de transmisión, los pulsos ópticos se verán también afectados por el efecto dispersivo.
- La fibra óptica monomodo SSMF es la que mayor valor de longitud no lineal presenta, esto se debe a que tiene la mayor área efectiva en comparación a las fibras DSF y NZ-DSF, por esta razón esta fibra presenta una buena respuesta ante los efectos de SPM.

REFERENCIAS

- [1] A. Leiva, Efectos de la Dispersión de Modo de Polarización, Tercera edición, 2007.
- [2] B. Ortega, Redes Ópticas, 2007.
- [3] C. Bianchi, Guías de Onda Ópticas. PDF 2003.
- [4] D. Abellan, Sistema de comunicaciones ópticas, 2007.
- [5] D. Grosz, "Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de alta capacidad", Buenos Aires, Argentina, 2003.
- [6] G. Agrawal, Efectos no lineales de Fibra Óptica, 3ra edición, 2001.
- [7] H. Guano, P. Molina, M.S. Jiménez, Estudio y Simulación de los Efectos No lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una Fibra Óptica Monomodo, Revista Politécnica, Vol. 33. pp. 30-40. Enero 2014.
- [8] J. Albella, Optoelectrónica y Comunicación Óptica, 1988.
- [9] J. Martín, Sistemas de Redes Ópticas de Comunicaciones, Edición 2004. Editorial Isabel Capella
- [10] R. Diaz de la Iglesia, Comunicaciones por Fibra Óptica –Manual de Ingeniería-, Marcombo-Boixareu Editores, 1985.
- [11] TELNET - Fibras ópticas para NGN – Dispersión Cromática y PMD – 2009.