

Impacto del fenómeno de no linealidad FWM en un enlace Óptico WDM teniendo en cuenta Fibra Dispersiva

Manuel J. VENGOECHEA

Estudiante de Ingeniería Electrónica; Universidad Pontificia Bolivariana; Cir.1 #70-01, B11, Medellín, Colombia.

manuel.vengoechea@alfa.upb.edu.co

Resumen: En este artículo se muestran resultados de simulación considerando un enlace óptico WDM, teniendo en cuenta los fenómeno de no linealidad FWM o (Four Wavelength Mixed), con el objetivo de comparar su rendimiento, asumiendo tasas de transmisión en bits para 2.5 y 10 Gbps, utilizando tres longitudes de ondas primarias de 1450 nm, 1550 nm y 1650 nm para la transmisión de información; cuya separación es de 100 GHz para generar 16 canales o usuarios de información. Se realizaron pruebas con amplificadores ópticos EDFAS para analizar la robustez del enlace a una distancia máxima de 200 km e identificar los parámetros de OSNR, SNR y BER, para una transmisión robusta y efectiva. *Copyright © 2013 UPB Kosmos.*

Abstract: This paper shows the results of simulation considering an optical WDM link, taking into account the nonlinearity phenomenon or FWM (Four Wavelength mixed) with the aim of comparing its performance, assuming transmission bit rates to 2.5 and 10 Gbps, using three primary wavelengths of 1450 nm, 1550 nm and 1650 nm for the transmission of information which is 100 GHz spacing to generate 16 channels or users of information. Tests were conducted to analyze optical amplifiers EDFAs link robustness to a maximum distance of 200 km and identify OSNR parameters, SNR and BER for a robust and effective transmission.

Keywords: OSNR, WDM, SNR, Four Wavelength Mixed, Optical Fiber, Dispersion, Optical Amplifier.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de los servicios interactivos y de entretenimiento suministrados actualmente por las redes de telecomunicaciones, así como de la tendencia a la convergencia de los servicios de voz IP sobre una única plataforma de red, permiten que los usuarios de estos servicios comiencen a hacer un uso masivo de estas herramientas; aumentando así los niveles de tráfico y sobre todo los de ancho de banda. Por tal motivo es que se hace necesario establecer parámetros de desempeño, ofrecidos por las diferentes técnicas de acceso óptico, para el mejoramiento de la calidad de información en redes robustas y aplicadas a una mayor distancia en su propagación. Los resultados de las simulaciones permitirían contribuir al problema de establecer cuál sería la mejor técnica de acceso al medio para un entorno de operación establecido, buscando el mayor desempeño posible (alta velocidad de operación, baja distorsión, etc) y bajos costos. Este conocimiento puede ser interesante para una empresa que posea redes ópticas, ya que ayudaría a determinar la mejor configuración de equipos y tecnología para alcanzar una alta competitividad en el medio.

Cómo se trata de una tecnología que últimamente ha tomado un auge alto en investigación e implementación relativamente nuevo en nuestro país, no hay un modelo preciso que permita simular y proyectar los parámetros de desempeño y fenómenos de no linealidad (FWM) en una red totalmente óptica, para largas

distancias. Lo cual despertó un interés en determinar este modelo y el estudio a profundidad de esta tecnología.

Básicamente, los problemas de este tipo parten del uso masivo de la Internet y del rápido desarrollo de aplicaciones tales como: correo electrónico, páginas web, chat, educación virtual, video juegos, videoconferencia, TV interactiva, entre muchos otros. Esto establece, que se requiera proyectar y ampliar el ancho de banda de las redes, de tal modo que soporten el tráfico presente, aumente la velocidad de operación y sobre todo el bajo costo proyectado para los años futuros. En instituciones universitarias en Colombia y en otros países se han realizado investigaciones y/o trabajos de grado sobre redes ópticas implementando efectos no lineales desde distintos puntos de análisis, lo cual muestra la importancia del estudio de estas y a la vez suministro de información para el proyecto. Es muy importante resaltar que lo que se busca con este proyecto de grado es mejorar la transmisión y recepción de la información sobre este tipo de redes ópticas.

Entre los principales centros de investigación en comunicaciones ópticas que estudian estos fenómenos cuyo impacto es alto a nivel mundial tenemos la el laboratorio de comunicaciones ópticas de University of Southern California; El centro de investigación de la universidad cuenta con una gran cantidad de tecnología para la medición de parámetros, observación de fenómenos no lineales aplicados a sistemas ópticos, entre otras. Dentro de sus equipos, cuenta con diferentes dispositivos ópticos y herramientas de

simulación como OptSim, haciendo de este una herramienta computacional muy confiable [1]. También encontramos el centro universitario de Arizona, el cual está altamente reconocido a nivel mundial por sus capacidades e infraestructura. Entre las áreas de interés para el desarrollo de prácticas y experimentación se encuentra el tema Design methodology for WDM backbone networks using FWM-aware heuristic algorithm y RWA scheme minimizing FWM effect in a wide área optical network, las cuales analizan el fenómeno no lineal en redes ópticas [4].

Por último podemos resumir que la información disponible relacionada con el Impacto del fenómeno de no linealidad FWM en un enlace óptico WDM teniendo en cuenta Fibra Dispersiva, se observa que en Asia, Europa y Norteamérica se encuentra mucha mayor información que la disponible en Latinoamérica y concretamente en Colombia [5].

Con este proyecto se pretende mostrar la eficiencia de la red óptica a través de las simulaciones, profundizando en los aspectos técnicos de un enlace óptico en la red de acceso, los diferentes servicios que se pueden ofrecer, teniendo en cuenta el modelamiento de las técnicas de acceso especificadas en la red óptica a emplear, los cuales son puntos claves a tener en cuenta en el momento de diseñar este tipo de redes.

Estos modelos permiten desarrollar simulaciones, considerando varios usuarios con acceso simultáneo y tasas de transmisión

diferentes. Este proyecto será valioso para aquellas empresas que se encuentran en la etapa de implementación de esta clase de tecnologías, así como para los proveedores de este tipo; donde las aplicaciones serán soportadas por infraestructura de banda ancha con mejor velocidad de operación. Lo anterior redundará en beneficios para las empresas proveedoras, mejorando el efecto de sus inversiones al satisfacer a los usuarios con servicios de óptima calidad en el momento oportuno y a precios razonables.

Por último podemos resumir que la información disponible relacionada con el Impacto del fenómeno de no linealidad SPM en un enlace óptico WDM teniendo en cuenta Fibra Dispersiva, se observa que en Asia, Europa y Norteamérica se encuentra mucha mayor información que la disponible en Latinoamérica y concretamente en Colombia [4]. La organización del documento es la siguiente: En el capítulo II se presenta un breve resumen de la red de acceso óptica. El capítulo III presenta los fenómenos de no linealidad y análisis de FOUR FOUR-WAVE MIXING mezclado de cuarta onda (FWM) en la red óptica. El capítulo IV presenta los Análisis y Resultados de la Simulación. Finalmente el capítulo V se presenta las conclusiones.

2. RED DE ACCESO ÓPTICA

Las redes de acceso ópticas, conocidas como FTTx (Fiber to The x) han crecido en popularidad ya que permiten lograr un mayor

alcance, ancho de banda y calidad de servicio que las redes de acceso basadas en cobre.

De acuerdo con ITU G.983.1, los componentes de una red de acceso óptica (OAN, optical access network) son:

- Red de distribución óptica (ODN, optical distribution network): proporciona el medio de transmisión óptica desde el OLT hasta los usuarios.
- Terminal óptico de línea (Optical Line Terminal, OLT): proporciona la interface al lado de la red de la OAN y se ubica en la HE o CO y sirve a una serie de ONUs en una topología punto-multipunto o en árbol.
- Unidad óptica de red (Optical Network Unit, ONU): proporciona la interface al lado del usuario de la OAN, corresponde al OLT donde finaliza la fibra óptica. En FTTH recibe el nombre de ONT (Optical Network Terminal).

La sección ODN puede ser activa o pasiva y su arquitectura puede ser punto a punto o punto a multipunto. Algunas arquitecturas de redes de acceso ópticas (OAN, optical access network) para FTTx. Las arquitecturas FTTx difieren en la cercanía del ONU con el usuario final, siendo la arquitectura Fibra hasta el Hogar FTTH (Fiber to the Home) la de mayor cercanía, seguido por la arquitectura Fibra hasta el Edificio/Acometida

(FTTB/C, Fiber to the Building/Curb) y finalmente Fibra hasta el Armario (FTTCab, Fiber to the Cabinet).

La arquitectura FTTB tiene dos escenarios, uno para las unidades multi-vivienda (MDU, Multi-Dwelling Unit), y el otro para las empresas [5, 6].

En FTTB para MDU se emplean servicios asimétricos como por ejemplo, servicios de difusión digital, vídeo por demanda (VOD, video on demand) y descarga de archivos. También se emplean servicios simétricos como por ejemplo, difusión de contenidos, correo electrónico, intercambio de archivos, cursos a distancia, telemedicina, juegos en línea. Estos servicios pueden complementarse con el servicio telefónico ordinario (POTS, Plain Old Telephone Service) y red digital de servicios integrados (RDSI). En FTTB para empresas se prestan servicios de banda ancha simétricos como por ejemplo, aplicaciones informáticas para trabajo en grupo, difusión de contenidos, correo electrónico e intercambio de archivos, complementando con servicios POTS. En las arquitecturas FTTH, FTTC, FTTCab se ofrecen servicios asimétricos y simétricos como los empleados en FTTB dependiendo del escenario MDU o empresarial.

FTTH ha crecido en popularidad y al respecto se encuentran dos alternativas: punto a punto y PON (Passive Optical Network) siendo esta última más económica [8, 9].

2.1. Limitaciones de las Redes Ópticas

Actualmente la implementación de redes totalmente ópticas presenta algunos inconvenientes, los cuales se mencionan a continuación:

- Escasa madurez con dispositivos DWDM recientes.
- Existencia de dispersión cromática y por modo de polarización en las fibras ya instaladas.
- Acumulación de diferencias de ganancias para distintas longitudes de onda en redes con EDFA en serie.
- La conmutación de paquetes sobre las capas ópticas obliga a disponer de buffers de almacenamiento en los nodos ópticos.
- Los dispositivos sintonizables son caros y tienen rango de sintonía baja lo que reduce la cantidad de canales a Multiplexar.
- Ausencia de métodos efectivos de administración y gestión de redes.

3. FENÓMENOS DE NO LINEALIDAD Y ANÁLISIS FOUR-WAVE MIXING O MEZCLADO DE CUARTA ONDA (FWM) EN LA RED ÓPTICA

Entender que los sistemas de comunicaciones ópticas se comportan linealmente es una aproximación adecuada cuando se opera a unos niveles de potencia moderados. Sin embargo, a altas

velocidades y potencias muy elevadas, se empiezan a ser notables los efectos de las no linealidades, y en el caso de sistemas WDM estos efectos son significativos, limitando el número de canales del sistema y la separación entre ellos [10, 11].

Como es sabida, las no linealidades se pueden clasificar en dos categorías:

- Las que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo (también conocido como efecto Kerr) aplicado, que a su vez es proporcional al cuadrado de la amplitud: modulación de autofase (SPM), modulación de fase cruzada (CPM) y la mezcla de cuarta onda (FWM).
- Las que se producen por efectos de scattering en la fibra, debido a la interacción de las ondas de luz con los fonones (vibraciones moleculares) en el silicio: scattering estimulado de Raman (SRS) y el scattering estimulado de Brillouin (SBS).

La respuesta de cualquier dieléctrico a campos electromagnéticos intensos es una respuesta no lineal. Por lo tanto, al aplicar un campo eléctrico E a una fibra óptica, aparece un campo de polarización inducida P que resulta no ser lineal con el campo E . En condiciones de homogeneidad, isotropía, pero no linealidad, este campo P se puede expresar como:

$$P_{(r,t)} = P_L(r,t) + P_{NL}(r,t), \quad (1)$$

donde $P_L(r, t)$ corresponde a la polarización en condiciones de linealidad y $P_{NL}(r, t)$ se denomina polarización no lineal, que como su nombre indica surge debido a las condiciones de no linealidad. Además se cumple que:

$$P_{NL}(r, t) = \epsilon_0 c^{(3)} E^{(3)}(r, t), \quad (2)$$

donde $c^{(3)}$ recibe el nombre de susceptibilidad no lineal de tercer orden. La susceptibilidad no lineal de segundo orden $c^{(2)}$ no se tiene en cuenta por carecer de importancia en materiales con simetría molecular como es el caso del SiO₂.

Puesto que el índice de refracción está relacionado con la susceptibilidad por la ecuación [13, 14]

$$\hat{n}(E) = n + \frac{3}{8n} X^{(3)} E^2. \quad (3)$$

La polarización no lineal es la causante de que el índice de refracción llegue a depender de la intensidad del campo dando lugar a efectos no lineales como el SPM, CPM o FWM.

Por otra parte, en los efectos de scattering, un fotón de la onda incidente desaparece para dar lugar a un fotón de frecuencia

inferior y un fonón con la energía y el momento adecuado. De este forma, a medida que la onda incidente se propaga por la fibra, pierde potencia que va a parar a otra onda llamada onda Stokes. En general, los fenómenos de scattering se caracterizan por un coeficiente de ganancia g , y una potencia umbral a partir de la cual los efectos comienzan a ser notables [14].

3.1. Red de Acceso Óptica Mezclado de cuarta onda (FWM)

La FWM es un fenómeno por el cual cuando se propagan varias ondas a frecuencias $w_1, w_2 \dots w_n$, donde la dependencia con la intensidad del índice de refracción no sólo induce a desplazamientos de fase dentro de cada canal sino también a la aparición de nuevas ondas a frecuencias $w_i \pm w_j \pm w_k$. Entre estas señales, las más problemáticas son las que corresponden a:

$$w_{(i,j,k)} = w_i + w_j - w_k, \quad (1)$$

con i y j distintos de k .

Porque para medios en los que la dispersión no es nula el resto de ellas puede despreciarse debido a la carencia de concordancia de fase. Para comprender los efectos de la FWM se puede considerar un sistema WDM con tres canales donde el campo eléctrico es de la forma [15]:

$$E_{(z,t)} = \sum_{i=1}^3 E_i * \cos(w_i t - \beta_i z), \quad (2)$$

donde $w_{(i,j,k)} = w_i + w_j - w_k$, $i, j, k = \{1, 2, 3\}$ con i y j distintos de k .

aún en presencia de dispersión, pueden llegar a satisfacer la condición de concordancia de fase por tener una constante de propagación casi constante para esas frecuencias, sin embargo el resto de componentes no la satisfarán, y por lo tanto podrán despreciarse. Teniendo en cuenta las pérdidas en la fibra, la potencia de estas nuevas ondas generadas debido al efecto FWM [15, 16], será de:

$$P_{i,j,k} = \left(\frac{w_{i,j,k} \bar{nd}_{i,j,k}}{3 \times c \times A_e} \right) \times P_i \times P_j \times P_k \times Z_e \times e^{-\alpha Z}, \quad (3)$$

donde $d_{i,j,k}$ es un factor de degeneración cuyo valor es 3 cuando $i = j$, y de valor 6 cuando i es distinto de j .

De entre los distintos dispositivos fotónicos utilizados para inducir FWM, las fibras ópticas son uno de los más estudiados. Como se ha comentado en la introducción, para que el proceso de generación sea eficiente, es necesario trabajar cerca de la longitud de onda de dispersión nula. Por ello, las fibras de

dispersión desplazada se convierten en el principal candidato. A continuación pasaremos a estudiar las características del FWM en estos dispositivos. El proceso de FWM en fibras ópticas ha sido extensamente estudiado [15, 16, 17]. Su origen se debe a que la polarización inducida en el medio no es lineal con respecto al campo aplicado, sino que contiene un término no lineal cuya magnitud depende de la susceptibilidad no lineal de tercer orden, $\chi^{(3)}$, de acuerdo a [15]:

$$P_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(3)} \times E, \quad (4)$$

donde E es el campo eléctrico, P_{NL} es la polarización no lineal inducida y ϵ_0 es la permitividad del vacío. Ahora considerando cuatro ondas ópticas oscilando a frecuencias w_1, w_2, w_3 y w_4 linealmente polarizadas a lo largo del mismo eje x , el vector campo eléctrico total puede escribirse como:

$$E = \hat{x} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 E_i \exp[j(w_i t - k_i z)] + c,$$

(5)

donde $k_i = \frac{\bar{n}_i w_i}{c}$, Siendo \bar{n} el índice de refracción de la onda i -ésima, y se supone que todas las ondas se propagan en la misma

dirección z . Si a continuación sustituimos (5.2) en la ec. (5.1) y expresamos P_{NL} de la forma [15]:

$$P_{NL} = \hat{x} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 P_i \exp[j(w_i t - k_i z)] + c, \quad (6)$$

Se encuentra que P_i para $i = 1, 2, 3, 4$, consiste en un gran número de términos que involucran productos de tres campos eléctricos. Por ejemplo, P_{NL} puede expresarse como [16]

$$P_4 = \frac{3\epsilon_0}{4} x \left\{ \left[|E_4|^2 + 2(|E_2|^2 + |E_3|^2) \right] E_4 + \left[2E_1 E_2 E_3 \exp(j\theta_+) + 2E_1 E_2 E_3 \exp(j\theta_-) + \dots \right] \right\}, \quad (7)$$

donde $x = \frac{3n_0}{8} N_2$ y las fases se calculan como [16]:

$$\theta_+ = (w_1 + w_2 + w_3 - w_4)t - (k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z, \quad (8)$$

$$\theta_- = (w_1 + w_2 - w_3 - w_4)t - (k_1 + k_2 - k_3 - k_4)z, \quad (9)$$

El término proporcional a E_4 es responsable de los fenómenos de SPM y XPM, mientras que los restantes términos son responsables del FWM. La eficiencia de estos términos depende de la fase relativa entre E_4 y P_4 , dada por θ_+ , θ_- , o un ángulo similar. Un FWM significativo ocurre si la fase relativa se anula prácticamente, lo cual requiere la coincidencia de las frecuencias además de los vectores de onda. Este requerimiento se le conoce habitualmente con el nombre de coincidencia de fase (phase matching).

En términos de mecánica cuántica, el FWM ocurre cuando los fotones de dos o más ondas son destruidos y se crean nuevos fotones a frecuencias diferentes, de tal forma que la energía y momento netos se conservan durante la interacción paramétrica. La principal diferencia entre los procesos paramétricos y los procesos de scattering estimulado es que la condición de fase se satisface automáticamente en el caso del scattering estimulado de Raman o de Brillouin, como consecuencia de la participación activa del medio no lineal. Por el contrario, la condición de fase requiere una elección adecuada de las frecuencias e índices de refracción para que los procesos paramétricos ocurran.

Ahora, existen dos tipos de términos de FWM. El primero de ellos corresponde al caso en el cual tres fotones transfieren su energía a un único fotón de frecuencia $w_4 = w_1 + w_2 + w_3$.

Este término es responsable del fenómeno conocido como generación de tercer armónico cuando $w_1 = w_2 = w_3$, o conversión de frecuencia a la onda $2w_1 + w_3$ cuando $w_1 = w_2 \neq w_3$.

En general, resulta difícil satisfacer la condición de fase para que estos procesos ocurran con altas eficiencias en fibras ópticas, por lo que desde este momento nos referiremos con FWM al segundo de los términos. Este último término corresponde al caso en que dos fotones de frecuencias w_1 y w_2 desaparecen junto con la creación simultánea de dos fotones a frecuencias w_3 y w_4 tales que $w_3 + w_4 = w_1 + w_2$, [16].

3.2. Análisis del (FWM) en la fibra.

Ahora consideremos la propagación del proceso de FWM en una SMF. Utilizando notaciones similares a las de [16], los campos eléctricos de las cuatro ondas pueden escribirse como:

$$E_j = A_j(z)F_j(x, y)\exp[j(w_j t - k_j z)], \quad (10)$$

donde $F_j(x, y)$ son funciones de onda que describen la distribución transversal de cada onda en la fibra. A_1 y A_2

representan las ondas de bombeo, mientras que A_3 es la señal de entrada y A_4 la señal conjugada generada por FWM. Obsérvese que A_j no depende del tiempo, dado que se está analizando el caso de onda continua (sin modulación). En el análisis se supondrá que las cuatro frecuencias se encuentran cerca del punto de dispersión nula de la SMF. No obstante, el espaciado entre las cuatro ondas se supone lo suficientemente grande como para que sólo se induzca FWM, mientras que procesos de mezclado de orden superior entre las nuevas ondas generadas y las de entrada puedan despreciarse. Además, el análisis se realiza sin considerar el SPM o XPM. Esto se justifica en el caso de potencias de entrada moderadas, lo cual es cierto para diodos láser operando cerca de 1300 ó 1500 nm. En primer lugar, se analizará el caso de FWM no degenerado, donde las cuatro frecuencias se consideran distintas. Este proceso está gobernado por el siguiente sistema de ecuaciones de modos acopladas [17]:

$$\frac{dA_1}{dz} = -j \frac{N_2 w_1}{c} 2f_{1,2,3,4} A_2^+ A_3 A_4 \exp(j\Delta k z) - \frac{\alpha}{2} A_1, \quad (11)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = -j \frac{N_2 w_2}{c} 2f_{2,1,3,4} A_1^+ A_3 A_4 \exp(j\Delta k z) - \frac{\alpha}{2} A_2, \quad (12)$$

$$\frac{dA_3}{dz} = -j \frac{N_2 w_3}{c} 2f_{3,4,1,2} A_1^+ A_2 A_4 \exp(j\Delta kz) - \frac{\alpha}{2} A_3, \quad (13)$$

$$\frac{dA_4}{dz} = -j \frac{N_2 w_4}{c} 2f_{4,3,1,2} A_1^+ A_2 A_3 \exp(j\Delta kz) - \frac{\alpha}{2} A_4, \quad (14)$$

donde las $f_{i,j,k,l}$ son constantes que describen el solapamiento de los modos en la SMF. Como se observa, los términos responsables del SPM y XPM se han descartado en (11) y (12), al igual que los efectos dispersivos puesto que no existe modulación de las portadoras [17].

4. ANALISIS Y RESULTADOS

En este trabajo se evaluó el comportamiento de la señal transmitida, partiendo de una breve explicación acerca de la topología de esta tecnología. Analizara el escenario de simulación para una señal de video con longitud de onda de 1450 nm, 1550 nm y 1650 nm de 20 a 200 km con la idea de analizar los efectos no lineales FWM, y el espectro de potencia que se genera, debido a la FWM, a la salida de una fibra óptica. La simulación en cierta parte considera un sistema formado por tres tonos diferentes de la tercera ventana de transmisión cuya potencia no sea superior a un watio. Por otra parte se analizara los parámetros de relación señal a ruido, factor Q, diagrama de ojo y potencia Óptica en el enlace.

Es importante mirar el comportamiento de fenómenos de no linealidad a estas distancias, ya que nos permiten identificar que tan robusta es el enlace y que podemos anticipar para el mejoramiento de la transmisión en un enlace de 1500 km (en investigación), mejorar el numero de repetidores, splitters, amplificadores, filtros, etc. Teniendo en cuenta estos análisis puedo determinar que tan eficaz es el enlace.

4.1. Modelo Físico de la Simulación

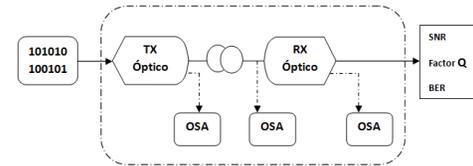


Figura 1. Enlace de red óptica empleada

El diagrama de conexión del enlace óptico se presenta en la Figura 1, esta topología es igual al trabajo de tesis del estudiante Hugo ballesta y es un modelo de enlace óptico en donde se estudiaran los fenómenos de no linealidad FMW en la red óptica.

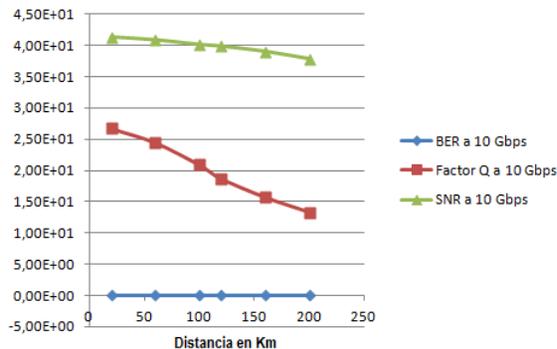


Figura 2. Gráficas resultado de simulación para 10 Gbps

En el enlace de la figura 1 se emplearon longitudes de onda 1450 nm, 1550 nm y 1650 nm de 20 a 200 km. Los principales efectos en propagación que afecta al sistema son los fenómenos de no linealidad y la dispersión, los cuales depende de la tasa de bits, el ancho espectral de la fuente óptica y la longitud de la fibra óptica.

La figura 3 nos muestra la simulación del BER, Factor Q y SNR para los diferentes resultados de simulación del enlace óptico tiene en cuenta: La tasa de transmisión de 10 Gbps, la Distancia en Km, Longitud de onda empleada.

El objetivo principal de las simulaciones es medir los parámetros de desempeño como son el BER, Factor Q, relación señal a ruido SNR y señal Óptica en el enlace, afectado principalmente por la dispersión cromática, para diferentes tasas de bits y diferentes anchos espectrales, para distancias entre 20 km y 200 km en longitud de fibra. Las pruebas se realizaron con el detector PIN.

Para la propagación de la señal en el enlace óptico teniendo en cuenta el efecto no lineal FWM, se implementaron pruebas con tasas de 2.5 Gbps y 10 Gbps, suficiente para transmitir video a todos los usuarios de la red. Se realizaron pruebas con diferentes valores de ancho espectral (FWHM). El ancho espectral de la fuente óptica incide directamente en su costo.

Se empleó fibra tipo estándar de 20 km, 40 km, 60 km, 90 km, 120 km, 150 km, 170 km, 200 km de longitud y se realizaron pruebas con diferente número de usuarios en la red aplicando WDM. En la figura 3, podemos observar como es el comportamiento de la señal entrada y salida de potencia en el espectro, teniendo en cuenta el FWM. Para el caso se están propagando los 32 canales con un consumo de potencia significativo. La simulación en la figura 4 nos permite ver el espectro de potencia generado por el efecto de la mezcla de cuarta onda (FWM) a partir de tres tonos diferentes de la tercera ventana de transmisión. Por lo tanto, el espectro mostrará tanto la potencia como la longitud de onda de cada tono de partida y de cada uno de los espúreos generados. Además, para tener en cuenta también el efecto de las pérdidas de la fibra, el usuario podrá seleccionar el

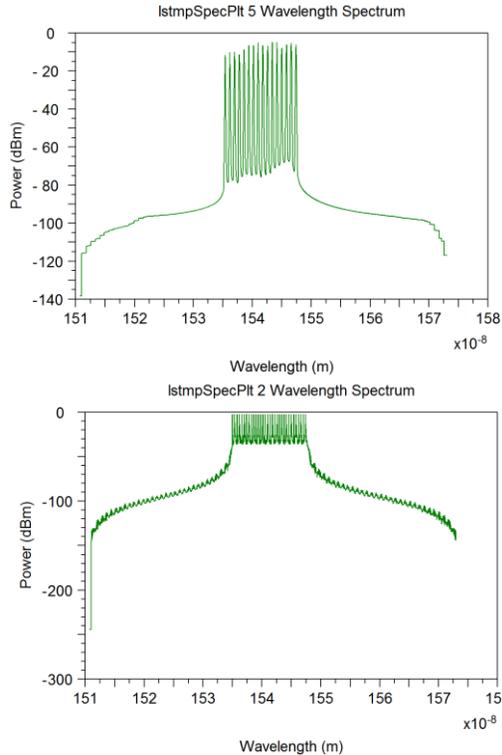


Figura 3. Simulación Espectro, entrada y salida de potencia, teniendo en cuenta FWM

coeficiente de absorción de la fibra. En primer se colocaron los siguientes datos: primer tono a una longitud de onda $\lambda_1 = 1551$ mm, segundo tono a una longitud de onda $\lambda_2 = 1554.5$ mm, y el coeficiente de absorción de la fibra 0.217 dB/km.

En la representación gráfica sólo podrá apreciar los tres tonos de partida puesto que todavía no se han comenzado a propagar y por lo tanto no se ha generado ningún espúreo, sin embargo, el cuadro resumen situado a la derecha ya indica a qué longitudes de onda se generarán los espúreos cuando se propaguen los tonos.

Se analiza y comprueba que las longitudes de onda a las que se generarán los espúreos son 1.44, 1.47, 1.48, 1.5, 1.51, 1.54 y 1.55 mm, Tabla 3, estos corresponden a las de la expresión: $\lambda_{ijk} = \lambda_i + \lambda_j - \lambda_k$ para $i, j, k = \{1, 2, 3\}$ con i y j distintos de k . Ahora si analizamos la simulación las figuras 4 y 5, en varios pasos, se verá que al propagarse los tonos 3 km y 6 km. Los espúreos comienzan a crecer en potencia puesto que a pesar de las pérdidas de la fibra, el efecto de la FWM provoca que la potencia de los espúreos aumente con la distancia. Sin embargo, los tonos de partida al sufrir las pérdidas van perdiendo potencia. También puede parecer curioso que considerando unas pérdidas constantes con la frecuencia, los tres tonos iniciales no sigan teniendo el mismo valor de potencia (potencia 1 es distinto de potencia 2 y de potencia 3). Esto se debe a que el batido de los tonos de partida ha provocado que se generen algunos espúreos

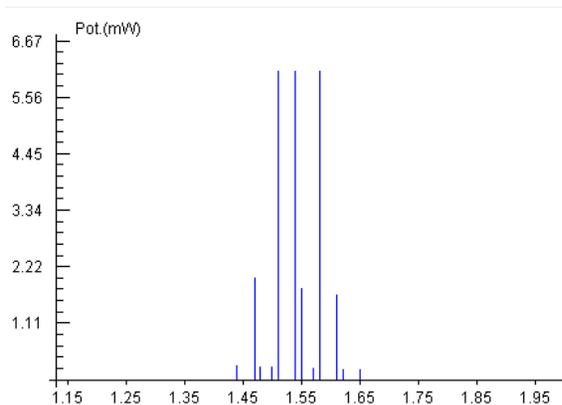


Figura 4. Simulación en pasos de a 1, del efecto FWM, Potencia vs Longitud de onda

con distintas potencias en las mismas frecuencias que las de los tonos de partida. Si cambiáramos la longitud de onda del tercer tono de partida, no se generará ningún espúreo que se solape con los tonos de partida, y por lo tanto éstos, aunque a medida que se vayan propagando van a perder potencia, siempre coincidirán en su valor.

Al analizar mas pasos los espúreos van tomando cada vez más presencia en relación con los tonos de partida.

Tabla 1. Relación longitud de onda Vs potencia

Longitud de Onda (nm)	Potencia (mW)
1444	0.259
1470	1.988
1480	0.245
1500	0.239
1510	6.067
1540	6.067
1550	1.788
1570	0.218
1580	6.067
1610	1.657
1620	0.205
1650	0.197

Es muy importante tener presente este hecho, ya que en general nuestro sistema tendrá que satisfacer una cierta relación SNR y por lo tanto la FWM limitará la distancia de los enlaces. De todas formas, a partir de una cierta distancia, en este caso 200 km. Aproximadamente, para los espúreos las pérdidas de la fibra

tendrán más peso que el efecto de la FWM y también comenzarán a perder potencia.

Ahora si se aumentar la potencia de alguno o todos los tonos de partida teniendo en cuenta las mismas longitudes de onda con la misma potencia de 10 mW, se analizo el valor de potencia de los espúreos generados a esa distancia, los efectos de la FWM aumentan con la potencia de los tonos de partida, es decir, si partimos con tonos con mayor potencia, los espúreos que se generan también tendrán mayor potencia. Por último si cambiamos el valor del coeficiente de absorción (0.217 dB/km a 0.3 dB/km), al aumentar la absorción aumentarán las pérdidas, y por lo tanto los tonos de partida como los espúreos perderán potencia con mayor rapidez.

Al cambiar el valor del coeficiente de absorción (0.217 dB/km a 0.3 dB/km), al aumentar la absorción aumentarán las pérdidas, y por lo tanto los tonos de partida como los espúreos perderán potencia con mayor rapidez.

Se concluye para estos resultados, que al disminuir la distancia de propagación existirá un mejor comportamiento en la propagación de la señal. Puede observarse que al incrementar la tasa de bits se disminuye el valor del BER. Este efecto se atribuye a la dispersión de la fibra óptica. Puede observarse que el BER en la señal de video incrementa al incrementar la tasa de bits. Esto se atribuye al efecto Raman, debido a que hay un intercambio de potencia entre las longitudes de onda establecidas y la teoría predice que el efecto es más notable al disminuir la tasa de bits. Teniendo en cuenta la figura 6, la relación señal a ruido (SNR) debe permanecer a un determinado nivel para mantener la señal de datos separada de la señal de ruido, Al amplificar la señal, también se amplifica el ruido, por lo que la elección de la distancia entre los amplificadores es una decisión importante, por lo tanto a mayor sea la SNR, mejor comportamiento tendrá el enlace óptico.

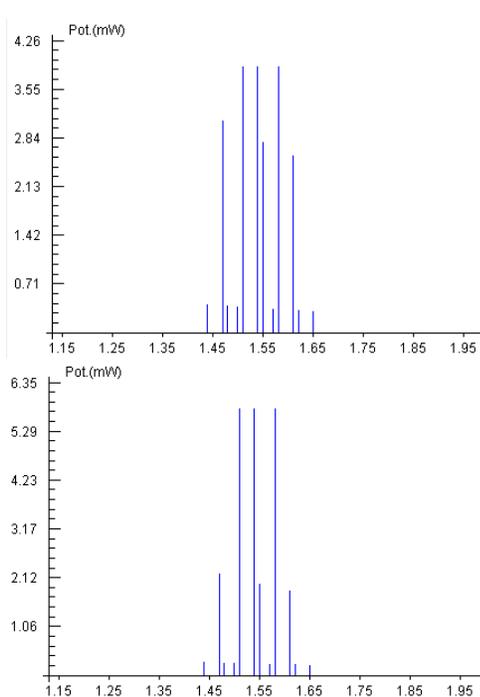


Figura 5. Simulación en paso 2 del efecto FWM, Potencia vs Longitud de onda

Ahora a medida que el orden del factor Q aumenta el fenómeno de no linealidad es menor, esto se hace más efectivo a mejoramiento de potencia en la salida del amplificador y análisis de módulos dispersivos que permiten mejorar la propagación de la señal. Al analizar la tasa de BER, para 10 km presenta un valor de $2,65E-10$ estando en un margen efectivo según estándares

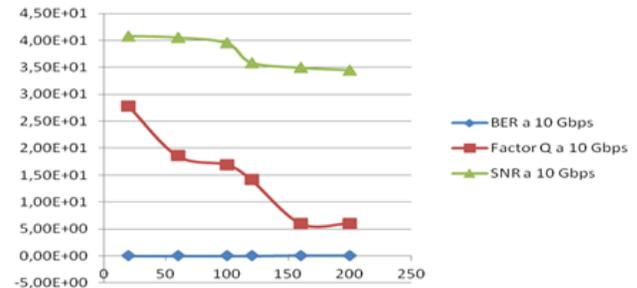


Figura 6. Curvas Factor Q, SNR, VER vs Distancia para 10 Gbps

analizados en artículos y simulaciones [17], ahora el límite efectivo de BER para una distancia de 100 km es de $1,49E-08$, presentando un valor efectivo para sistemas de comunicaciones, pero se ve afectado por los fenómenos no lineales de FWM.

Teniendo en cuenta los resultados de la figura 7 podemos observar que a medida que la tasa de transmisión del enlace disminuye su propagación a través de la red óptica es muy efectiva. Los diagramas de ojo presentan menos distorsiones y dispersiones en sus cuadrículas generando menos ruido y robustez en el sistema. Analizando las distintas distancias entre 20 km y 200 km la tasa de error es muy efectiva para no decir caso ideal, veamos que su tara entre las distancias de 20 km y 60 km es casi ideal $1,52E-09$ y un factor Q de 38,7854, para un medio de comunicación óptico, al igual que para 100 km y 160 km el BER $8,75E-07$, es muy efectivo. Para transmisiones de mayor distancia

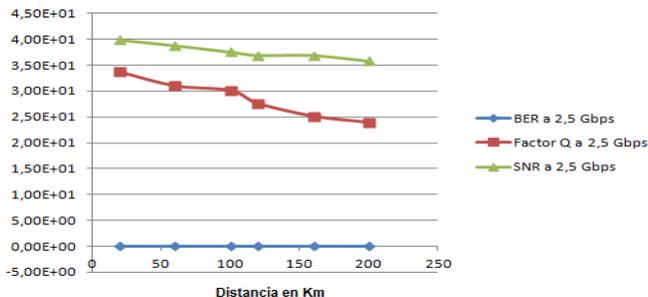


Figura 7. Gráficas resultado de simulación para 2.5 Gbps

alrededor de los 200 km se obtuvo una tasa de $3,53E-03$ con un factor Q de 23,8754, que significa una eficiente propagación de

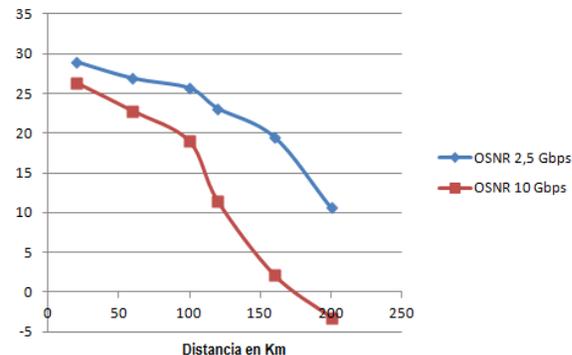


Figura 8. Curva OSNR vs Distancia 2,5 Gbps y 10 Gbps

señal. La relación SNR podemos observar que es muy efectiva para distancias superiores a 120 km, ($36,8952 \text{ dB} - 36,8745 \text{ dB} - 35,7854 \text{ dB}$), teniendo en cuenta que para comunicaciones ópticas un valor de relación señal a ruido eléctrica esta en el orden de los (30 – 40) dB; para nuestra simulación se presentan valores muy efectivos debido al mecanismo de amplificación óptica que empleamos, el amplificador EDFA con su ganancia de regeneración y fibra dispersiva permitió que el enlace trabajara de manera robusta y eficaz.

Por último la figura muestra la relación de las señales ópticas o OSNR para las dos tasas de transmisión, El comportamiento en la señal óptica es muy efectivo, teniendo en cuenta FWM el cual es eficiente para las distancias establecidas permitiendo así que el enlace en la parte eléctrica y óptica sea eficaz. Su relación OSNR es casi ideal haciendo que el motor computacional de OPTSIM y el modulo de fibra dispersiva generara de manera optima los resultados. Ahora, el diagrama de Potencia Óptica para los diferentes resultados de simulación del enlace óptico tiene en cuenta: La tasa de transmisión de 2.5 Gbps, la Distancia en Km, Longitud de onda empleada. A medida que aumenta la distancia la potencia óptica varia en relación a 4,6 db aproximadamente, pero presentando un fenómeno interesante en algunas distancias. Por ejemplo para el caso de 20 km se presenta un pulso efectivo en un orden de 28,962 db aproximadamente, de 60 a 120 su diferencia es de 3 db aproximadamente disminuyendo su potencia óptica a un 2 db para 120 km, y para los casos de 200 km la potencia óptica se presenta por debajo del umbral de 14 dB. Con respecto a 10 Gbps es muy efectiva su propagación y se visualiza que el comportamiento del pulso no se deteriora y se presentan distintos fenómenos para dañar el pulso óptico. Esto a su vez, se agradece su mejoría al fenómeno de mejoramiento en fibra dispersiva que se le adiciono a la simulación para mejorar los fenómenos no lineales.

5. CONCLUSIONES

Se determinaron diferentes efectos de propagación en el enlace óptico como lo es la dispersión, distorsión y efecto no lineal FWM, el cual dependen básicamente de las longitudes de onda de operación con que se trabajen y su frecuencia de separación. Se analizo por medio de herramientas de simulación como se dan los efectos de no linealidad en la red óptica real, y sobre todo FWM teniendo en cuenta Tres longitudes de onda básicas en operación real. Las simulaciones se realizaron con una separación de 100 GHz, transmitiendo a 16 canales y generando 32 canales teniendo en cuenta el efecto FWM en la red óptica, con diferentes tasas de bits. El enlace se trabajo con, amplificación óptica y con receptores tipo PIN.

En el enlace teniendo en cuenta el efecto FWM, si se aumenta la potencia de las frecuencias o todos los tonos de partida teniendo en cuenta las mismas longitudes de onda con la misma potencia de 10 mW, el valor de potencia de los espúreos generados a esa distancia y los efectos de la FWM aumentan con la potencia de los tonos de partida, es decir, si partimos con tonos con mayor potencia, los espúreos que se generan también tendrán mayor potencia. Por último si cambiamos el valor del coeficiente de absorción (0.217 dB/km a 0.3 dB/km), al aumentar la absorción aumentarán las pérdidas, y por lo tanto los tonos de partida como los espúreos perderán potencia con mayor rapidez. Esto permitiría que en los enlaces de mayor alcance se debe tener cuidado al incremento de potencia, lo mas recomendado es estudiar los

fenómenos de no linealidad antes de implementar este tipo de enlaces. De igual manera si se incrementa la tasa de bits se disminuye el valor del BER. Este efecto se atribuye a la dispersión de la fibra óptica o parámetro de fibra dispersiva. Se obtiene un mejor desempeño para la tasa de transmisión de 2.5 Gbps en comparación con 10 Gbps. Sin embargo, al emplear el parámetro de fibra dispersiva y amplificación óptica ideal para el transporte de la señal, a tasas de 10 Gbps no se ve tan deteriorada la información, permitiendo trabajar de manera efectiva a las tasas de transmisión empleadas y a las distintas distancias.

Puede observarse que el BER en las distintas distancias aumenta al incrementar la tasa de bits en la longitud de onda de 1550 nm. Esto se atribuye al efecto Raman, debido a que hay un intercambio de potencia en la longitud de onda de 1550 nm y la teoría predice que el efecto es más notable al disminuir la tasa de bits.

En las simulaciones, en que los efectos de FWM tienen un mejor desempeño para las longitudes de fibra inferiores a 60 km; el amplificador EDFA permite generar un mejor desempeño para las longitudes de fibra superiores a 75 km. Esta información permite decidir el tipo de amplificador a emplear dependiendo de la longitud del enlace y dependiendo del desempeño o valor de SNR requerido. Para los tipos de enlaces ópticos, la tasa de transmisión que más se ve afectada por los efectos de propagación y efectos no lineales es la de 10 Gbps; pero no quiere decir que es la más ineficiente ya que sus resultados gráficos y valores teóricos

muestran un buen comportamiento al implementarles fibra dispersiva. En este caso se observa un mejor desempeño a tasas de 2.5. Este análisis prevé un buen desempeño para el transporte de señales de estándares de video y datos a través de la fibra óptica. De esta forma, la amplificación óptica puede usarse para extender la longitud de los enlaces ópticos para aplicaciones de enlaces ópticos teniendo en cuenta efectos dispersivos en la fibra. Adicionalmente, los resultados obtenidos permiten como trabajo futuro obtener un mayor entendimiento del funcionamiento de los enlaces ópticos, conocimiento que puede ser empleado en próximas aplicaciones para obtener una herramienta de simulación más completa.

AGRADECIMIENTO

William Segundo Puche Plaza, Magister en Ingeniería, por su colaboración en el conocimiento y en el buen enfoque del proyecto. Y en general a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] CRT. Informe de Internet, Comisión Nacional de Telecomunicaciones. [En línea], <<http://www.crcom.gov.co/index.php>>, Consultado en 2012-08-03

- [2] Estándar ITU-T G.983.1. Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON). [En línea], <<http://www.infocellar.com/networks/new-tech/PON/PON-real.htm>>, Consultado en 2012-08-15.
- [3] Sierra, J.E. Optimización de Redes de Transporte Ópticas WDM para el soporte de tráfico UNICAST/MULTICAST, EMPLEANDO Traffic Grooming, Business Briefing: Global Optical Communications. [En línea], Universidad Pontificia Bolivariana, Consultado en 2012-08-03.
- [4] Park, S.J., Lee, C.H. Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing Passive optical network, Journal of Lightwave Technology. Vol. 22. No 11. [En línea], <<http://www.cablecat.com/personales/almuh/cablem1.htm>>, Consultado en 2012-09-21.
- [5] Banerjee, A.B., Park, Y., Clarke, K y Mukherjee, K.K. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review. [En línea], <http://www.oamr.puspc.com/index_files/Data%20Communication%20Systems/E-books/0387921303.pdf>, Consultado en 2012-09-21.
- [6] Tafur, I. Distributed fiber Raman amplification in long reach PON bidirectional access links. [En línea], <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520007000260>>, Consultado en 2012-10-03.
- [7] Piehler, D., Chen, C. Nonlinear Raman Cross-Talk in a Video Overlay Passive Optical Network, OFC 2003 Conference Proceedings, TuR5, pp. 285-286, 2008. [En línea], <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2003-TuR5>>, Consultado en 2012-10-05.
- [8] Mao, X.P., Bodeep, G. E., R.W. Tkach, A.R. Chraplyvy, T.E. Darcie, y R.M. Derosier. Suppression of Brillouin Scattering in lightwave AM-VSB CATV Transmission Systems, OFC Technical Digest Series, pp. 141-142, 1993. [En línea], <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=OFC-1993-WI8>>, Consultado en 2012-10-11.
- [9] Chen, M.J.Li, X., Wang, J., Ruffin, A. B., Walton, D.T., Nolan, S.Li, Gray, S y Zenteno, L.A. Fiber Designs for Reducing Stimulated Brillouin Scattering, Optical Society of America. [En línea], <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1636371&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1636371>, Consultado en 2012-10-08.
- [10] Singh, S., Kaler, R.S. Simulation of DWDM signals Using Optimum Span Scheme Communication Engineering, Giani Zail Singh College of Engineering and Technology, Bathinda, Department of Electronics and Communication Engineering, Tahapar Institute of Engineering and Technology, Patiala, India. [En línea], <http://www.researchgate.net/publication/223353654_Simulation_of_DWDM_signals_using_optimum_span_scheme_with_cascaded_optimized_semiconductor_optical_amplifiers>, Consultado en 2012-10-08.

- [11] Agrawal, G.P. Fiber Optic Communication System, Wiley, Singapore, Consultado en 2012-10-11.
- [12] Agrawal, G.P. Nolinear Fiber Optics. Optics and Photonics. Third Edition 2001, Consultado en 2012-10-11.
- [13] Hsin, M.W., Taga, H. An Experimental Study of XPM and SPM Upon a Long-Haul RZ-DSPK Transmission System With a Block-Type Dispersion Map, Journal of Lightwave Technology, vol. 17, no. 10, pp. 1713–1723, [En línea], < http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText%3DSELF+PHASE+MODULATION+spm&addRange=2010_2013_Publication_Year&pageNumber=1&resultAction=REFINE >, Consultado en 2012-06-06.
- [14] Chatelain, B., Laperle, C., Krause, D., Roberts, K., Chagnon, M. Xian, X., Borowiec, A., Gagnon, F., Cartledge, J.C. y Plant, D.V. FWM-Tolerant Pulse Shaping for 40- and 100-Gb/s Dual-Polarization QPSK Systems. [En línea], < http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText%3DSELF+PHASE+MODULATION+spm&addRange=2010_2013_Publication_Year&pageNumber=1&resultAction=REFINE >, Consultado en 2012-10-08.
- [15] Baveja, P.P., Maywar, D.N., Kaplan, A.M., Agrawal, G.P. Self-Phase Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers: Impact of Amplified Spontaneous Emission. [En línea], < http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText%3DSELF+PHASE+MODULATION+spm&addRange=2010_2013_Publication_Year&pageNumber=1&resultAction=REFINE >, Consultado en 2012-09-13.
- [16] Abdullah, S.h., Fatimah, T. FWM effect in FTTH over DWDM for 320 Gbps link distance 80 km. [En línea], http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6271265&contentType=Conference+Publications&ranges%3D2009_2013_p_Publication_Year%26queryText%3DFWM >, Consultado en 2012-07-06.
- [17] Singh, P., Surinder, P. Effect of SRS and FWM on performance of optical star WDM networks: A deterministic approach. [En línea], http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5587358&contentType=Conference+Publications&ranges%3D2009_2013_p_Publication_Year%26queryText%3DFWM >, Consultado en 2012-09-13.

AUTOR



Manuel José VENGOECHEA MENDOZA, nacido el 17 de Diciembre en Riohacha, La Guajira, Colombia; Estudiante pregrado de ingeniería Electrónica de la universidad pontificia Bolivariana, Medellín Antioquia.

Sus áreas de interés se centran principalmente en las telecomunicaciones y comunicaciones Ópticas.