

La Fibra Óptica y el Fenómeno no Lineal Mezcla de Cuarta Onda.

The Optical Fiber and the Nonlinear Phenomenon Fourth Wave Mixing

Fabián Gómez López¹, *Estudiante investigador*. Karla Cecilia Puerto López², *Docente investigadora*.
Dinael Guevara Ibarra, *Docente investigador*³

Junio
2015
Edición N° 9
Pág
43 - 59

RESUMEN

Para aprovechar de mejor manera el ancho de banda que tiene la fibra óptica, los sistemas de comunicaciones ópticos han tenido que aumentar la potencia de transmisión de las señales para poder transportar a grandes distancias la información. Debido a lo anterior, comienzan a producirse ciertos fenómenos ópticos no lineales como la mezcla de cuarta onda (Four Wave Mixing, FWM), que degradan la señal de información. En este documento se realiza un estado del arte de la fibra óptica y un estudio del fenómeno no lineal FWM, que se genera cuando dos o más señales ópticas se propagan en la fibra, lo cual conlleva a una mezcla de señales que puede generar nuevos componentes de interferencia de la señal óptica transmitida.

PALABRAS CLAVE--Multiplexación WDM, Modulación de amplitud OOK, Auto modulación de fase SPM, Red óptica pasiva XGPON, Diafonía Crosstalk.

ABSTRACT

To make better use of the bandwidth that has the optical fiber, optical communications systems have had to increase the transmission power of signals to transport information over long distances. Because of this, certain nonlinear optical phenomena such as four wave mixing (Four Wave Mixing, FWM), which degrade the information signal begin to occur. Herein a state of the art of optical fiber and a study of the nonlinear FWM phenomenon, which is generated when two or more optical signals propagating in the fiber takes place, which leads to a mixture of signals that can generate new components interference of the transmitted optical signal.

KEYWORDS- WDM multiplexing, OOK amplitude modulation, phase modulation SPM Auto, Passive Optical Network XGPON, Crosstalk Crosstalk.

1. Fabián Gómez López, Coinvestigador. Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones. Universidad Francisco de Paula Santander. fabiangomez@ufps.edu.co. Cúcuta. Colombia.

2. Karla Cecilia Puerto López, Investigador principal. Magister en ingeniería en telecomunicaciones. Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones. GIDT. Universidad Francisco De Paula Santander. karlaveciliapl@ufps.edu.co @ufps.edu.co. Cúcuta. Colombia.

3. Dinael Guevara Ibarra. Coinvestigador. Ingeniero Electricista. Doctor en Ingeniería área Telecomunicaciones. Grupo De Investigación y Desarrollo En Telecomunicaciones. GIDT. Universidad Francisco De Paula Santander. dinaelgi@ufps.edu.co. Cúcuta. Colombia

Actualmente se encuentra en un periodo liderado por las comunicaciones en tiempo real y formato digital. Por ello las innovaciones y mejoras de los sistemas de comunicaciones digitales están en continua evolución con el fin de transmitir información a grandes distancias, de forma fiable, eficiente y de alta calidad [1].

Esta evolución ha favorecido en la aparición de nuevos medios de transmisión tales como la fibra óptica, capaces de transmitir gran cantidad de datos a velocidades mayores a la de otros medios de transmisión y con menores niveles de atenuación, lo cual genera gran fiabilidad. La fibra óptica se utilizó exclusivamente en enlaces de larga distancia pero con el tiempo su uso se ha ido extendiendo por todos los segmentos de la red llegando recientemente hasta el hogar a través de la red de acceso a servicios, conocidos como (Fiber to the Home, FTTH) [2].

En este sentido existen diversas tecnologías disponibles y topologías implementadas a fin de realizar un despliegue de acceso mediante fibra hasta el hogar. Una de estas tecnologías son las redes pasivas con capacidad de Gigabit (Gigabit-capable Passive Optical Network, XGPON), son redes de fibra óptica cuyos componentes son enteramente pasivos en la red de distribución, alcanzando velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps, esta tecnología se encuentra definida por las recomendaciones G.987, G.987.1, G.987.2 y G.987.3 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union, UIT). [3], [4].

El incremento del ancho de banda requerido por los sistemas de comunicaciones al utilizar estas tecnologías XGPON y redes de acceso FTTH, junto con técnicas de multiplexación más eficientes como la de Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelen-

gth Division Multiplexing, WDM), han conllevado a la aparición de efectos no lineales como la Mezcla de Cuarta Onda (Four Wave Mixing, FWM), debido al aumento de la potencia y la velocidad de transmisión. Este fenómeno no lineal causa degradación en la señal óptica restringiendo el desempeño de la transmisión.

Debido a esto, este documento está enfocado en realizar un análisis del estado actual de la fibra óptica y el fenómeno no lineal mezcla de cuarta onda FWM en una transmisión óptica.

■ FIBRA ÓPTICA

A. Perspectiva histórica de las comunicaciones ópticas.

El uso de la luz en la transmisión de señales no es reciente, los antiguos griegos solían usar espejos para transferir información, de modo primitivo, mediante luz solar. En 1792, Claude Chappe diseñó un sistema de telegrafía óptica que permitía transmitir un mensaje en tan sólo 16 minutos entre distancias de 200 Km [5].

En el año 1959, como resultado de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser, que fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin de que los mensajes se transmitieran a grandes velocidades y con amplia cobertura. Sin embargo la utilización del láser era muy limitada debido a que no existían los canales adecuados para hacer viajar las ondas electromagnéticas provocadas por los fotones originados en las fuentes de luz [5].

Fue entonces cuando los científicos y técnicos especializados en óptica reorientaron sus esfuerzos a la producción de un medio material, conocido hoy como

la fibra óptica; para finalmente obtener en 1961 una propuesta de Elías Snitzaer de utilizar una guía de onda óptica para la comunicación ya que la comparaba con una guía de onda dieléctrica [5].

Después en 1966 Charles Kao, publica sus avances notables logrados con el cable de fibra óptica sobre el gran ancho de banda pero con muchas pérdidas igual a 2000 dB/Km. En 1970 Robert Maurer y Donald Keck, logran alcanzar la meta propuesta inicialmente por Kao de 20 dB/Km para esta guía de onda óptica. En 1977 los cables de fibra óptica alcanzan un nivel de pérdidas < 2 dB/Km, y desde entonces han ido evolucionando para cumplir las diferentes prestaciones de los usuarios [5].

La onda electromagnética que viaja dentro del cable de fibra óptica es de la misma naturaleza que las ondas de radio, con la única diferencia que la longitud de las ondas son del orden de los micrómetros en lugar de metros o centímetros; ésta es la forma de utilizar la luz como portadora de información.

Las fibras ópticas pueden ahora usarse como los alambres de cobre convencionales, tanto en pequeños ambientes aislados, así como en grandes áreas geográficas. La historia de la comunicación a través de la fibra óptica revolucionó el mundo de las telecomunicaciones, con aplicaciones en todos los aspectos de la vida moderna, lo que constituyó un avance tecnológico valiosamente efectivo [5].

B. Generalidades de la fibra óptica.

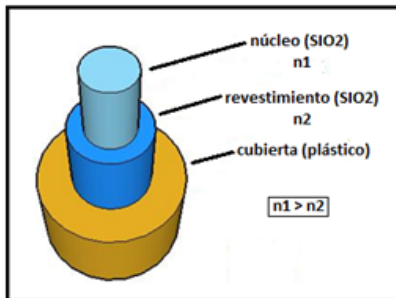
A lo largo de toda la creación y desarrollo de la fibra óptica, algunas de sus características más destacables, así como ciertos principios básicos han ido modificándose para mejorarla hasta llegar a la fibra óptica en la actualidad [5].

La fibra óptica es un hilo muy delgado y flexible de material transparente que determina una guía de onda luminosa, su estructura es extremadamente compacta y puede estar hecha de vidrio (dióxido de silicio SiO_2) o plástico; por el cual se envían señales lumínicas que representan los datos a transmitirse. Básicamente la luz atrapada al interior de la fibra se propaga a la máxima velocidad posible a lo largo de la misma, sin embargo, los principios básicos de su funcionamiento se evidencian al aplicar las leyes de refracción y reflexión de la luz. El cable de fibra óptica es apropiado para transmitir datos a velocidades muy altas y con gran capacidad debido a la escasa atenuación de la señal y a la pureza obtenida en la recepción de la misma [5].

Las fibras ópticas son filamentos generalmente en forma cilíndrica con un grosor de $125 \mu\text{m}$ aproximadamente, el doble que el cabello humano, que consisten en un núcleo de vidrio y un revestimiento de vidrio o plástico. En la Figura 1, se observa la estructura física y su composición interna donde se visualizan sus tres partes principales, que son:

- Núcleo: Es la parte interior de la fibra, que está fabricado por un material dieléctrico, normalmente, vidrio de sílice (SiO_2) dopado para ajustar su índice de refracción cuyo diámetro oscila entre $4 \mu\text{m}$ y $1000 \mu\text{m}$ dependiendo del tipo de fibra (típicamente entre $4 \mu\text{m}$ y $62,5 \mu\text{m}$).
- Revestimiento: Es la capa que envuelve al núcleo, fabricado con materiales similares al núcleo pero con un índice de refracción menor, para que se produzca el fenómeno de la reflexión interna total.
- Cubierta: Generalmente fabricada en plástico que protege mecánicamente a los dos componentes anteriores.

Figura 1. Estructura interna de la fibra óptica.



Fuente: Sitio web: <http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm>

C. Ventajas y desventajas de la fibra óptica.

Las comunicaciones a través de fibra óptica tienen grandes ventajas sobre las comunicaciones que usan cables metálicos,

a continuación se presentan las ventajas y desventajas presentes en la fibra óptica.

Las ventajas más notables son aquellas derivadas del gran ancho de banda, su gran capacidad de transmisión de información, alcanzando tasas de transmisión del orden de 32 THz.Km, su baja atenuación. Esto permite emplear enlaces de forma que cada 80 o 100 km coloquemos un amplificador o regenerador (en comparación con un cable coaxial que se requiere un regenerador o amplificador cada 2 km). La Tabla 1, muestra algunas propiedades y beneficios de la fibra óptica como guía de onda.

Las principales desventajas de la fibra óptica son: su elevado costo para aplicaciones en las que no se necesita tanta capacidad, no son adecuadas para sistemas de difusión y la gran delicadeza con la que hay que tratar la fibra óptica y demás componentes ópticos, pues requieren una gran limpieza y los conectores son muy sensibles

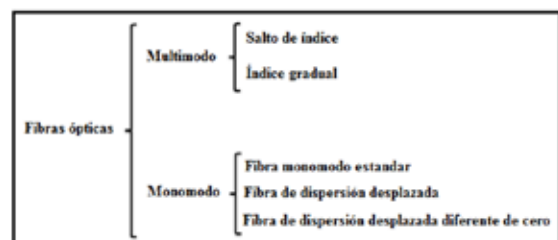
D. Tipos de fibra óptica.

Las fibras ópticas se pueden clasificar atendiendo a los diferentes parámetros ópticos, geométricos o dinámicos que las definen: Por la aplicación a que se destinen (fibras de alta o media calidad), por el perfil del índice de refracción (constante o variable), por el número de modos transmitidos (monomodo o multimodo), por los materiales del núcleo y el revestimiento y su composición [6]. En la Figura 2, se observa el esquema general de los tipos de fibra óptica.

Figura 2. Clasificación de las fibras ópticas.

Tabla 1. Propiedades y beneficios al utilizar una fibra óptica

PROPIEDADES	BENEFICIOS
Bajas pérdidas	Menor número de repetidores
Alta anchura de banda	Bajo costo por canal
Pequeño tamaño, bajo precio y flexibilidad	Facilidad de instalación y transporte
Inmunidad a interferencias electromagnéticas y ausencias de radiaciones	Confiabilidad
Alta estabilidad con la temperatura	Viabilidad como medio de transmisión en condiciones climáticas adversas
Dificultad para captar sus emisiones	Seguridad



FIBRA ÓPTICA MONOMODO

Como su nombre indica en esta fibra sólo se propaga un modo, por lo que se evita la dispersión modal, debido a la diferencia de velocidad de propagación de los modos que se transmiten por la fibra. Esto se debe al pequeño tamaño de su núcleo menos de $9 \mu\text{m}$. En la Figura 3, se ilustra la estructura interna y el modo de propagación de una fibra monomodo.

Dentro de las fibras monomodo, encontramos tres tipos de fibras, según la aplicación a que se destine, tenemos:

- Fibra monomodo estándar: Conocida por sus siglas en inglés (Standar Single Mode Fiber, SMF). Este tipo de fibra Monomodo tienes como características más destacadas, una atenuación de unos $0,2 \text{ dB/km}$ y una dispersión cromática de $16 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$ en tercera ventana (1550 nm) [7].

- Fibra de dispersión desplazada: Las fibras de dispersión desplazada (Dispersion Shifted Fiber, DSF) son fabricadas de tal manera que logran tener una dispersión cromática nula en la tercera ventana. Debido a que su atenuación aumenta ligeramente (unos 0.25 dB/km); y su principal inconveniente se debe a los efectos no lineales como el fenómeno de mezclado de cuarta onda FWM, que imposibilitan la utilización de esta fibra óptica en sistemas WDM [7].

- Fibra de dispersión desplazada diferente de cero: Las fibras de dispersión desplazada diferente de cero (Non Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF), fueron creadas para resolver los inconvenientes de la fibra anterior. Tienen un valor de dispersión próximo a cero pero, no nulo, para lograr contrarrestar los efectos de los fenómenos no lineales mediante la dispersión cromática [7].

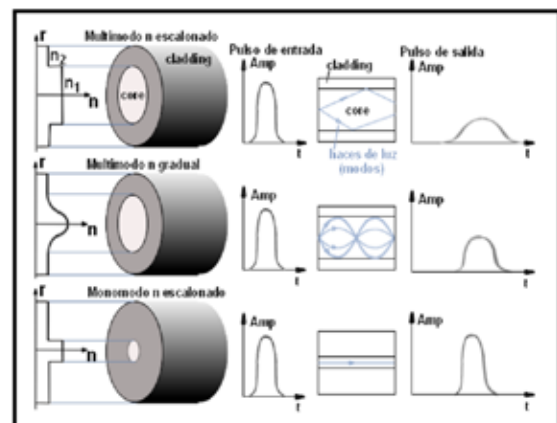
FIBRA ÓPTICA MULTIMODO.

A diferencia de las anteriores, en ellas se pueden propagar varios modos de forma simultánea. El diámetro del núcleo de este tipo de fibras suele ser $50 \mu\text{m}$ o $62.5 \mu\text{m}$, por lo que el acoplamiento de la luz es más sencillo que las anteriores.

Dentro de las fibras multimodo encontramos dos tipos de fibra, según su índice de refracción, tenemos:

- Fibra óptica de índice en escalón o de salto de índice. En este tipo de fibras el índice de refracción del núcleo y del revestimiento son uniformes, siendo el índice de refracción del núcleo sensiblemente mayor, por lo que el cambio de índice de refracción al pasar de una zona a otra cambia bruscamente, de ahí su nombre [7]. En la Figura 3, se ilustra la estructura interna y la manera en que se propaga la luz en la fibra óptica multimodo de índice escalonado.

- Fibra óptica de índice gradual. En este tipo de fibras el índice del núcleo varía gradualmente desde el centro del núcleo hasta el revestimiento. Con este tipo de fibras se reduce la dispersión modal, ya que con ellas se consigue reducir la diferencia de caminos que recorren los distintos modos que se propagan por la fibra [7]. En la Figura 3, se observa la estructura interna de la fibra óptica multimodo de índice gradual.



E. Principios de propagación de la luz en la fibra óptica.

Existen varios parámetros que caracterizan a una fibra óptica. Se habla de parámetros estructurales y de transmisión, que establecen las condiciones en las que se puede realizar la transmisión de información [6].

■ ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

La luz es una onda electromagnética, y por ende dicha onda puede oscilar en diferentes frecuencias, las cuales definen el “color”. La luz blanca está compuesta por todas las longitudes de onda, la cual al pasar por un prisma o medio óptico se difracta en diferentes ángulos según su longitud de onda descomponiéndose en colores [8].

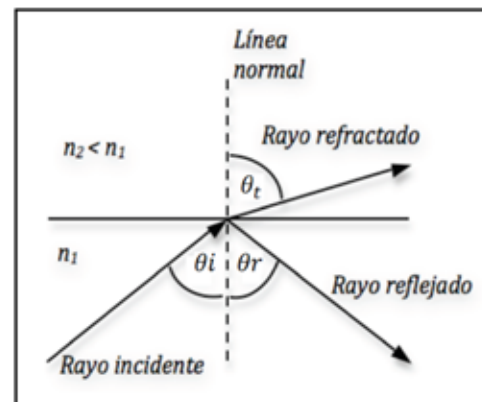
La región donde la fibra óptica y los elementos ópticos trabajan, incluye la luz visible al ojo humano que va desde las longitudes de ondas de los 400 a 700 nm. Sin embargo, para las fibras usadas en telecomunicaciones se usan longitudes de onda mayores (menores frecuencias), o las que se encuentran en la zona infrarroja.

Las longitudes de onda normalmente usadas en comunicaciones con fibras de silicio, están entre los 700 a 1600 nm en el infrarrojo cercano donde la fibra es más transparente. Las fibras de silicio y vidrio pueden transmitir la luz visible sobre distancias cortas, y ciertas clases de fibra pueden transmitir luz cercana al ultravioleta sobre distancias cortas [8].

■ REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

Cuando un haz de luz encuentra en su camino una superficie dieléctrica, se desdobla en dos haces (Figura

4), uno reflejado y otro refractado o transmitido, cuyos ángulos están relacionados con el ángulo de incidencia a través de la ley de Snell. La potencia óptica, por su parte, también se distribuye entre estos dos haces; el formulismo de Fresnel permite calcular tal distribución en función de unos coeficientes de campo, que dependen del ángulo de incidencia y de la polarización de la luz incidente [9].



Fuente: Ricardo Pinto García. “Sistemas de comunicaciones ópticas”. 2014. WSW

Ecuación 1. Ley de Snell.

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r)$$

Ángulo crítico y reflexión total.

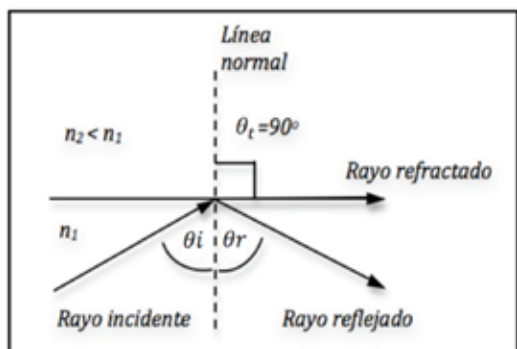
Si se examina la ley de Snell, se comprueba fácilmente que un haz luminoso con cualquier ángulo de incidencia puede desdoblarse en una parte reflejada y otra transmitida, siempre que el índice de refracción del medio incidente sea inferior al del medio transmitido.

En caso contrario (Figura 5), si se aumenta paulatinamente el ángulo se alcanza un valor, llamado ángulo crítico, para el cual el haz de salida es rasante ($\text{Sen } \theta_t = 1$). Para ángulos superiores se produce un fenómeno denominado reflexión total interna. No existe compo-

Fuente: Ricardo Arturo Gómez Barrientos Valdivia, “Estudio y análisis de pérdidas en redes de fibra óptica basadas en el estándar sonet/sdh y su evolución hacia dwdm”, 2007.

nente transmitida, lo que resulta fundamental para comunicaciones ópticas debido a esto no se producen pérdidas en la reflexión [9]

Figura 5. Reflexión total interna.



Apertura numérica.

Como ya hemos visto, se guía sin pérdidas únicamente la luz que incide a la interface con un ángulo mayor que el ángulo crítico. Esta limitación condiciona el ángulo de entrada (llamado a veces ángulo de aceptación) de la radiación por el extremo de la guía: observando la Figura 6, se comprueba que el ángulo crítico θ_c determina un ángulo máximo de aceptación α_m , por encima del cual la luz introducida en la guía onda no se guía. El seno de ese ángulo recibe el nombre de apertura numérica AN, y es un parámetro fundamental que caracteriza una fibra óptica o guía de onda plana [9]. De la propia definición de ángulo crítico, aplicando la ley de Snell resulta que:

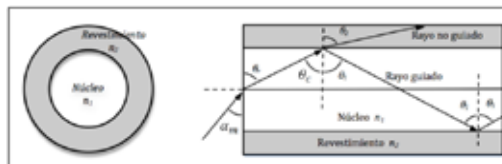
Ecuación 2. Angulo crítico de la fibra óptica.

$$\text{Sen } \theta_c = n_2/n_1$$

n_1, n_2 , índices de reflexión del medio 1 y 2.

$$AN = \text{Sen } \alpha_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

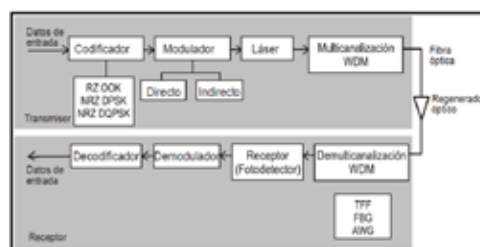
Ecuación 3. Apertura numérica de la fibra óptica



F. Sistema de comunicación óptico.

En principio un sistema óptico de comunicaciones se diferencia de un sistema de microondas únicamente por el rango de frecuencias de sus ondas portadoras. Las frecuencias de las portadoras ópticas son típicamente de alrededor de 200 THz [10], en contraste con las portadoras de sistemas de microondas, con frecuencias desde 300 MHz hasta 300 GHz.

En la Figura 7, se muestra un diagrama de bloques de un sistema óptico de comunicaciones, el cual consiste en un transmisor, un canal de comunicaciones y un receptor, que son elementos comunes para todos los sistemas de comunicaciones. Los sistemas ópticos de comunicaciones pueden ser clasificados en dos grandes categorías: guiados y no guiados [10]. En el caso de sistemas ópticos guiados, la luz permanece confinada en el espacio utilizando fibras ópticas, en el caso de los sistemas ópticos de comunicaciones no guiados, el haz óptico emitido por el transmisor se propaga en el espacio de manera similar a como lo hacen las microondas, el uso de esos sistemas requiere, en general, del apuntamiento preciso entre el transmisor y el receptor [10]



Fuente: José Giovanni López Perafán “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM”, 2011.

■ TRANSMISOR ÓPTICO

La función de un transmisor óptico es convertir una señal eléctrica en una señal óptica y enviar esta última hacia la fibra óptica. La Figura 7, muestra el diagrama de bloques de un transmisor óptico, que consiste en un codificador con retorno a cero (Return to Zero, RZ) o sin retorno a cero (Non Return to Zero, NRZ), un modulador (directo e indirecto), una fuente óptica o laser, un multicanalizador o un multiplexador WDM [10].

En las comunicaciones ópticas se buscan formatos de modulación más eficientes que permitan transmitir mayor cantidad de información y que sean más robustos frente a las limitaciones por dispersión y efectos no lineales. Los formatos de modulación más comúnmente utilizados en las comunicaciones ópticas, se pueden resumir en: Modulación con no retorno a cero (Non-Return-to-Zero-On-Off-Keying, NRZ-OOK), modulación con retorno a cero (Return-to-Zero-On-Off-Keying, RZ-OOK), portadora suprimida con retorno a cero (Carrier Suppressed Return to Zero, CS-RZ), modulación por desplazamiento de fase (Phase-shift keying, PSK), modulación por desplazamiento diferencial de fase (Differential Phase Shift Keying, DPSK), modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Quadrature Phase-Shift Keying, QPSK), Modulación por desplazamiento diferencial de fase en cuadratura (Differential Quadrature Phase-Shift Keying, DQPSK).

■ CANAL ÓPTICO.

La función de un canal de comunicaciones es transportar la señal (óptica) desde un transmisor hasta un receptor sin distorsionarla. La mayoría de los sistemas ópticos utilizan fibras ópticas como canal de comuni-

caciones, ya que las fibras de dióxido de silicio pueden transmitir la luz con pérdidas muy pequeñas (0.2 dB/km). Es por esta razón que las pérdidas de las fibras constituyen un parámetro de diseño importante y determinante el espaciamiento de los repetidores o amplificadores en un sistema óptico de largo alcance. Otros parámetros de diseño importante es la dispersión de la fibra, que provoca el ensanchamiento de los pulsos luminosos conforme se propagan. Si los pulsos ópticos se dispersan demasiado, la señal transmitida se degrada severamente, y a la larga será imposible recuperar con precisión la señal original [10].

■ RECEPTOR ÓPTICO.

Un receptor óptico convierte la señal óptica proveniente de la fibra óptica en la señal eléctrica original. La Figura 7, muestra un diagrama de bloques que consiste en un demultiplexador WDM, un receptor o foto detector, un demodulador y un decodificador. Los fotodiodos semiconductores son utilizados generalmente como foto detectores debido a su compatibilidad con el sistema en general. El diseño del demodulador depende del formato de modulación utilizado [10].

En este caso, la demodulación es realizada por un circuito de decisión que identifica a los bits como ceros y unos, dependiendo de la amplitud de la señal eléctrica. La precisión del circuito de decisión depende de la relación señal a ruido (Signal-to-Noise Ratio, SNR) de la señal eléctrica generada en el foto detector [10].

G. Pérdidas en un sistema de transmisión óptico.

En un sistema de comunicaciones ópticas, la fibra óptica constituye el canal de transmisión por excelencia.

Este canal debe estar en condiciones de realizar la mejor transmisión posible de una señal óptica. Sin embargo, existen diferentes factores que limitan la extraordinaria capacidad de transporte de información que posee la fibra. Es por lo tanto fundamental el estudio de sus características de propagación y transmisión.

La atenuación de la señal es una de las propiedades más importantes de una fibra óptica, pues reduce la potencia de la señal que llega al receptor. Como el receptor óptico necesita de una cantidad mínima de potencia para recuperar la señal correctamente, la atenuación entonces determina en gran medida la separación máxima entre el transmisor y el receptor en un sistema de comunicaciones ópticas. Otro factor de igual importancia es la dispersión de la señal. Los mecanismos de dispersión en una fibra generan que los pulsos de señal óptica que viajan a través de ella se ensanchen, generando errores en la salida del receptor y limitando la capacidad de información que puede transmitir la fibra [11].

■ ATENUACIÓN.

Un parámetro muy importante que limita la distancia máxima entre el transmisor y el receptor es la atenuación, debido a que el receptor necesita una cierta potencia mínima requerida para recuperar la señal de forma correcta. Es la disminución paulatina de la potencia de la señal conforme ésta se propaga a lo largo de la fibra óptica y puede estar dada por la absorción que presenta el sílice a ciertas longitudes de onda, por radiación de la energía, por esparcimiento o por imperfecciones de la fibra.

Se define como la relación entre la potencia de salida (P_{out}) de la fibra después de una cierta longitud L y la potencia óptica de entrada (P_{in}). La potencia óptica de salida puede ser calculada como:

Ecuación 4. Potencia de salida en la fibra óptica.

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L)$$

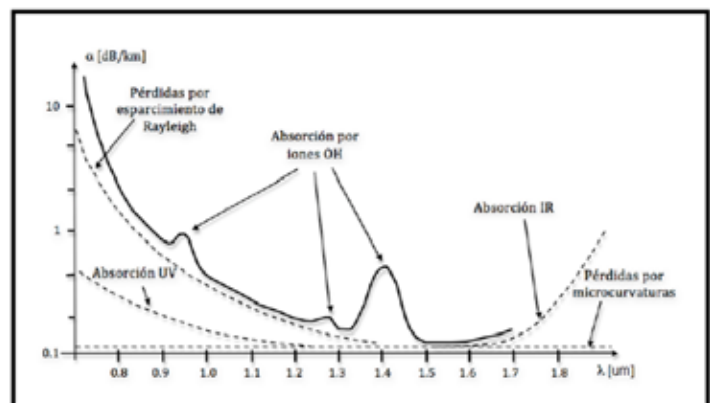
Donde α es el coeficiente de atenuación y es comúnmente expresado en dB/km mediante la siguiente expresión:

Ecuación 5. Coeficiente de atenuación.

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

Este coeficiente depende de la longitud de onda como se observa en la Figura 8. Debido a esta característica de las fibras ópticas, los dispositivos como láseres y receptores se han diseñado para trabajar en diferentes zonas de transmisión donde la atenuación es mínima. Hoy en día podemos encontrar fibras con coeficiente de atenuación mínimo de 0.15 dB/km.

Este coeficiente depende de la longitud de onda como se observa en la Figura 8. Debido a esta característica de las fibras ópticas, los dispositivos como láseres y receptores se han diseñado para trabajar en diferentes zonas de transmisión donde la atenuación es mínima. Hoy en día podemos encontrar fibras con coeficiente de atenuación mínimo de 0.15 dB/km.



■ DISPERSIÓN

Además de la atenuación, la señal que viaja por la fibra óptica también se ve degradada por efectos de la dispersión, la cual se puede dividir, en principio, en dispersión intermodal y dispersión intramodal. Estos dos efectos se pueden explicar si se examina el comportamiento de las velocidades de grupo de cada uno de los modos, donde la velocidad de grupo es la velocidad a la cual viaja la energía correspondiente a cada modo dentro de la fibra.

La dispersión intermodal o modal se debe básicamente a que cada modo de propagación tiene diferentes valores de la velocidad de grupo. Esto ocasiona que cada modo llegue en diferente tiempo al receptor, ocasionando el ensanchamiento del pulso. Viéndolo desde la óptica geométrica, rayos con diferentes direcciones de propagación (modos) recorren distancias diferentes [12].

La dispersión intramodal o cromática es aquella que se da dentro de un solo modo de propagación. Se debe a que la velocidad de grupo es función de la longitud de onda λ y debido a esta dependencia, si se tiene un ancho espectral de la fuente muy amplio entonces la degradación de la señal por esta dispersión crecerá [12].

■ DIAFONÍA

La diafonía o crosstalk en sistemas de comunicaciones ópticas, corresponde al término utilizado para determinar disturbios en la transmisión, causada por la interferencia de señales entre dos canales diferentes. Casi todos los componentes de sistemas WDM introducen Crosstalk, de una manera u otra. Dos formas de Crosstalk surgen en sistemas WDM: Crosstalk Intercanal y Crosstalk Intracanal.

- Crosstalk Intracanal: Este caso de Crosstalk ocurre cuando dos señales están a la misma longitud de onda, o se encuentran muy cerca una de la otra, tal que la diferencia entre longitudes de onda es menor que el ancho de banda del receptor, filtrándose ambas en este punto (receptor). Este tipo de Crosstalk también puede ser producido por los fenómenos no lineales como la mezcla de cuarta onda FWM.

- Crosstalk Intercanal: Este tipo de Crosstalk ocurre cuando dos señales se encuentran lo suficientemente alejadas, tal que la diferencia entre longitudes de onda es muy grande en comparación con el ancho de banda del receptor.

■ RUIDO.

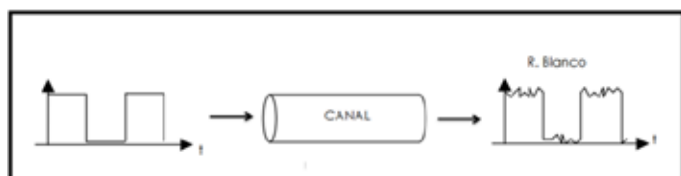
El ruido en fibra óptica es toda perturbación o interferencia no deseada que se introduce en el canal de comunicaciones y se suma a la señal útil. Existen múltiples fuentes de ruido, unas externas y otras internas al propio sistema de comunicaciones. Los diferentes tipos de ruido en fibra óptica son de origen interno en forma de ruido blanco, en la figura 9, se puede observar la forma del tipo de ruido blanco. Entre ellos tenemos:

- Ruido térmico, provocado por el movimiento aleatorio de los fotones de un material con la temperatura.
- Ruido shot debido a la amplificación de la señal.
- Ruido shot debido al utilizar amplificadores con emisión espontánea (Amplified Spontaneous Emission, ASE)
- Ruido debido a la diafonía o crosstalk.

En el ruido blanco su densidad de energía se distribuye por igual en todo el rango de frecuencias, y no es imposible predecir la magnitud de la tensión del ruido

en un momento determinado, por lo que se suele tratar de forma estadística.

Figura 9. Ruido en fibra óptica



Fuente: Propia.

La relación entre la potencia de la señal útil y la potencia del ruido es un parámetro fundamental para determinar la calidad de la transmisión. Dicha relación, denominada relación señal ruido, se expresa de forma logarítmica:

Ecuación 6. Relación señal a ruido óptica OSNR.

$$\text{OSNR} = 10 \log\left(\frac{S}{N}\right)$$

Donde S corresponde a la potencia en watt de la señal y N corresponde a la potencia en watt del ruido generado.

Fenómenos no lineales.

La idea de asumir que las señales que se propagan por la fibra óptica se comportan linealmente es una aproximación adecuada cuando se opera a niveles de potencia de unos pocos mW y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps. Sin embargo, a velocidades superiores como 10 Gbps o potencias más altas, es importante empezar a considerar los efectos no lineales. El uso de amplificadores o de tecnología WDM ocasionan que las potencias que se propagan por la fibra se incrementen de manera considerable (>20 dBm) y que estas no linealidades empiecen a jugar un papel importante en el análisis de un sistema de comunicaciones óptico [13].

Los efectos no lineales se pueden clasificar en dos categorías [13]:

- Los que se producen por la interacción de la onda con los fonones (vibraciones moleculares) en el sílice: esparcimiento estimulado de Raman (Stimulated Raman Scattering, SRS) y esparcimiento estimulado de Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering, SBS).
- Los que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo eléctrico aplicado, que a su vez es proporcional al cuadrado de su amplitud: auto-modulación de fase SPM, modulación de fase cruzada XPM y la mezcla de cuarta onda FWM.

En el caso de la auto-modulación de fase SPM, surge debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente del cuadrado de la intensidad del campo eléctrico. Este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. De esta forma, las diferentes componentes espectrales del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase, lo que provoca que el pulso adquiera un cierto chirp, que a su vez modificará los efectos de la dispersión sobre el pulso [12].

En el caso de sistemas WDM, el chirp inducido de un canal también depende de la variación del índice de refracción con la intensidad del campo de otros canales. La modulación de fase cruzada XPM se produce entonces entre diferentes canales WDM, de forma que la potencia de un canal puede afectar a la fase de otro [12].

Otro efecto no-lineal importante en sistemas WDM es la mezcla de cuarta onda o FWM, el cual es un fenómeno por el cual, cuando se propagan varias on-

das a frecuencias $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$, la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo eléctrico no sólo induce a desplazamientos de fase dentro de cada canal, sino también a la aparición de nuevas ondas a frecuencias $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ que pueden solaparse con otros canales. A diferencia de SPM y XPM que ocurren por lo general a altas tasas de transmisión, FWM es independiente de la tasa de bit (Bit Error Rate, BER), pero críticamente dependiente de la separación entre canales y de la dispersión cromática de la fibra [12] fenómeno no lineal mezcla de cuarta onda fwm.

La propagación de las ondas electromagnéticas está gobernada por la ecuación de Schrödinger, esta ecuación en el caso de la propagación de ondas en una fibra óptica monomodo permiten obtener la ecuación de onda que se presenta a continuación:

Ecuación 7. Ecuación no lineal de Schrödinger.

$$\frac{\partial E(z,t)}{\partial z} + \alpha E(z,t) - j \frac{\beta^2}{2} \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2} + j \gamma |E(z,t)|^2 E(z,t)$$

La ecuación 7, es conocida como la ecuación no lineal generalizada de Schrödinger, y es conocida porque puede ser aplicada en propagación de pulsos de duración corta, esta ecuación describe la propagación de la luz en una fibra no lineal dispersiva con atenuación.

El primer término de la ecuación describe a la atenuación en la fibra, el segundo término describe la dispersión por velocidad grupo, el tercer término describe la no linealidad debida al efecto Kerr, produciendo los fenómenos no lineales (SPM, XPM y FWM) y está determinado por el tercer término con dependencia de la intensidad [15].

El efecto Kerr fue definido por John Kerr (1824 – 1907), el efecto electro-óptico, llamado efecto Kerr,

genera fenómenos como la dispersión por modo de polarización (Polarization Mode Dispersion, PMD) y la dependencia no lineal del índice de refracción respecto de la intensidad de la onda incidente genera los efectos no lineales SPM, XPM y FWM. El índice de refracción de la fibra óptica depende de la potencia de la señal transportada y esta dependencia se expresa mediante la siguiente ecuación [16]:

Ecuación 8. Índice de refracción de la fibra óptica.

$$n = n_0 + n_2 \frac{P_{in}}{A_{eff}}$$

Donde n_0 es el índice de refracción lineal o índice de refracción efectivo de la fibra óptica en ausencia de efecto no lineal, n_2 es el índice de refracción no lineal, un valor constante para fibra de silicio de $n_2 = 2,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ y el cociente P_{in}/A_{eff} corresponde a la intensidad de la onda incidente, potencia P_{in} sobre área efectiva A_{eff} . Este efecto produce un ensanchamiento espectral del ancho del pulso. La contribución no lineal del índice de refracción genera un cambio de fase en la señal propagada de la forma [16]:

Ecuación 9. Cambio de fase en la señal propagada.

$$\phi_{NL} = \gamma P_{L_{eff}}$$

Donde se define el coeficiente no lineal γ y la longitud efectiva L_{eff} mediante las ecuaciones:

Ecuación 10. Coeficiente no lineal gamma.

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{c A_{eff}}$$

Ecuación 11. Longitud efectiva L_{eff} .

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

En donde C es la velocidad de la luz y f_p es la frecuencia del pulso. Además la constante de propagación tam-

bién se vuelve no lineal, dependiendo de la potencia aplicada.

Ecuación 12. Constante de propagación no lineal.

$$\beta = \beta + \gamma P$$

La ecuación 12, demuestra el efecto Kerr, donde se indica que a una alta intensidad de la onda se provocará un cambio en su constante de fase [16].

El FWM o mezclado de cuatro ondas, es un fenómeno generado cuando se propagan varias ondas a frecuencias $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$, por un mismo hilo de fibra óptica. La mezcla de cuatro ondas se produce de forma general cuando tres portadoras de frecuencias distintas ω_i, ω_j y ω_k , con potencias P_i, P_j y P_k , interactúan en el interior de la fibra para generar una cuarta onda. Esta cuarta onda se origina por la dependencia entre el índice de refracción de la fibra y la intensidad de la señal, relación que genera la aparición de nuevos pulsos de señal con nuevas frecuencias o longitudes de onda, que obedecen la siguiente ecuación [16]:

Ecuación 13. Mezcla de frecuencias por el fenómeno FWM.

$$\omega_{ijk} = \omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$$

La generación de nuevos pulsos por efecto FWM, se deben considerar en sistema WDM, puesto que pueden producir degradaciones en los canales de la transmisión.

La consideración de este efecto es importante cuanto más próximos estén los canales del sistema WDM, por lo tanto se debe analizar la relación espaciamiento entre canales y generación de pulsos por FWM para evitar diafonías [16].

Para comprender en detalle el efecto de FWM se considera un sistema de transporte de datos WDM con n canales donde el campo eléctrico se determina a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Campo eléctrico.

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

Y la polarización no lineal (Non-linear polarization, PNL) está dada por la ecuación 15:

Ecuación 15. Vector de polarización no lineal.

$$P_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(3)} E^{(3)}$$

Donde $\chi^{(3)}$ es la susceptibilidad de tercer orden. Para el caso, la polarización no lineal se determina a partir de la ecuación 16. El desarrollo de esta ecuación lleva el modelo descrito en la ecuación 17 [16].

Ecuación 16. Polarización no lineal.

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

En el desarrollo de la ecuación 16, aparece un conjunto de términos en los que las n frecuencias presentes aparecen mezcladas de todas las formas posibles, tanto entre sí como consigo mismas. Esto significa que, los nuevos campos que se generarían tendrían frecuencias de la forma $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$, donde las correspondientes $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ no han de ser necesariamente diferentes. La aparición de estas nuevas frecuencias, que surgen de la suma o resta de los valores de las tres iniciales, justifica el nombre que se le da a este

fenómeno, Mezclado de cuatro ondas FWM, ya que de tres de ellas surge una cuarta.

Si esta cuarta frecuencia coincide en valor con alguna de las tres anteriores, aparecerá diafonía y será la causa de que sea preciso estudiar su posición para evitarlo.

Dado que los términos de la forma $\omega_i + \omega_j - \omega_k$, con $i, j \neq k$, son los que, dan lugar a este fenómeno, serán a éstos términos a los que se haga una especial mención y se define mediante la siguiente ecuación [16]:

Ecuación 17. Frecuencia de la cuarta onda generada por FWM.

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$$

Y se especifica un factor de degeneración d_{ijk} cuando se cumplan los parámetros establecidos por la ecuación 18.

Ecuación 18. Factor de degeneración

$$d_{ijk} = \begin{cases} 3, & i \neq j \\ 6, & i = j \end{cases} d_{ijk}$$

El término de la polarización dieléctrica no lineal, correspondiente a la frecuencia ω_{ijk} y puede escribirse a partir de:

Ecuación. 19. Polarización dieléctrica no lineal.

$$P_{NL}(z,t) = \frac{(\epsilon_0 X^{(3)})}{4} d_{ijk} E_i E_j E_k \cos(\omega_{ijk} t - \beta_{ijk} Z)$$

A partir de la ecuación 19, y suponiendo que el área efectiva por la que propagan estos campos es A_{eff} , puede demostrarse que la potencia generada a la frecuencia ω_{ijk} , tras atravesar una distancia L viene dada por:

Ecuación 20. Potencia generada a la frecuencia ω_{ijk} .

$$P_{ijk} = \left(\frac{\omega_{ijk} d_{ijk} X^{(3)}}{8 A_{eff} n_{ef} C} \right)^2 P_i P_j P_k L^2$$

Donde P_{ijk} , son las potencias de entrada correspondientes a las frecuencias ω_{ijk} , y se ha tomado el índice de refracción efectivo n_{ef} , del modo fundamental. En función del índice de refracción no lineal n_{NL} , podrá también escribirse como se plantea en la siguiente ecuación:

Ecuación 21. Potencia generada a la frecuencia ω_{ijk} en función de n_{NL} .

$$P_{ijk} = \left(\frac{\omega_{ijk} d_{ijk} X^{(3)}}{8 A_{eff} n_{ef} C} \right) P_i P_j P_k L^2$$

En los análisis y cálculos anteriores se ha restringido al caso de que las tres frecuencias son diferentes, sin embargo este fenómeno aparece también en el caso que únicamente haya dos frecuencias distintas y las nuevas frecuencias o tono FWM que aparecerán están definidas por:

Ecuación 22. Frecuencia de la cuarta onda generada por FWM cuando $d_{ijk} = 3$.

$$2\omega_1 - \omega_2 \text{ y } 2\omega_2 - \omega_1$$

En general, si están presentes N canales, con N diferentes frecuencias, el número de nuevas señales M que podrán aparecer vendrá dado por la ecuación 23 [16].

Ecuación 23. Número de nuevas señales generadas por FWM.

$$M = \frac{1}{2} (N^{(3)} - N^{(2)})$$

Esto hace que el efecto FWM sea tanto más pronunciado cuantos más canales estén presentes.

Cálculos de interferencia no lineal FWM.

Dado el conjunto Z de N Canales definido como $Z = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\}$ a implementar en un sistema WDM, se calcula la cantidad M de posibles componentes de frecuencia interferentes generados por FWM mediante la ecuación 23. Cada canal o pulso generado por efecto FWM se establece con una nueva frecuencia o longitud de onda, que obedecen a la ecuación 17. Donde $k \neq i, j$ y k, i, j toman valores de $1, 2, 3, \dots, n$ [16].

La potencia óptica P_{ijk} del canal o pulso generado por FWM en ω_{ijk} , se establece al final del enlace mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ijk} = \left(\frac{d_{ijk} \gamma L_{\text{eff}}}{3} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta$$

Ecuación 24. Potencia óptica P_{ijk} del canal o pulso generado por FWM en ω_{ijk} .

Dónde:

- $D_{ijk} = 3$ si $i = j$ determinado como caso degenerado.
- $D_{ijk} = 6$ si $i \neq j \neq k$ determinado como caso no degenerado.
- γ : coeficiente no lineal.
- n_2 : es el índice de refracción no lineal que para fibras de sílice es $2,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$.
- A_{eff} : área eficiente del modo de propagado bajo consideración.
- L_{eff} : longitud efectiva de interacción no lineal de la fibra óptica.
- α : coeficiente de pérdidas no nulo de la fibra óptica.
- L : longitud del enlace óptico.
- P_i, P_j, P_k : potencias de los canales considerados en FWM.

- η : eficiencia de generación de FWM. Se calcula mediante la ecuación 25.

Ecuación 25. Eficiencia de generación de FWM.

$$\eta = \left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \right) \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right)$$

Donde, el parámetro $\Delta\beta = \beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - \beta_4$ es la relación de desfases ópticos en la propagación de las cuatro ondas consideradas, para valores de $\Delta\beta$ cercanos a 0 se define como condición de fase, y determinan que la eficiencia tiende a su valor máximo $\eta = 1$ y por lo tanto de los tonos generados por FWM, para encontrar el valor de $\Delta\beta$ se utiliza la ecuación 26 [16].

Ecuación 26. Desfases ópticos en la propagación.

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_0^2}{C} (f_i - f_k) (f_i - f_j) \left[D(\lambda_0) + \frac{\lambda_0}{C} (f_i - f_j) S(\lambda_0) \right]$$

Donde, $D(\lambda_0)$ (ps/nmkm) es el valor de la dispersión y $S(\lambda_0) = dD/d\lambda$ (ps/nm²km) es la pendiente de dispersión. λ_0 , es la longitud de onda donde se consideran los valores de la dispersión y su pendiente [16].

Dado que sobre un canal original ω_s establecido en el conjunto Z del sistema WDM a implementar puede recaer múltiples tonos o pulsos generados por efecto FWM producto de las diferentes combinaciones de tonos, canales o frecuencias originales del sistema WDM, se deben calcular todas las interferencias FWM presentes en el canal ω_s por las múltiples combinaciones de canales. La participación de las diferentes interferencias FWM producto de cada combinación de canales sobre el canal ω_s se puede establecer de la siguiente forma:

- La sumatoria de todas las interferencias FWM producto de combinaciones cuando todos los canales son diferentes $i \neq j \neq k \neq s$ [16].
- La sumatoria de todas las interferencias FWM producto de combinaciones cuando todos los canales i, j, k son diferentes pero k toma el valor del canal interferido s esto es $i \neq j \neq k \neq s$.
- La sumatoria de todas las interferencias FWM producto de las combinaciones cuando los canales i, j son iguales y k es diferente de i, j . Adicionalmente i, j, k son diferente de s ; esto es $i = j \neq k$ con $i, j, k \neq s$ [16].

Con lo anterior se establece que la potencia de ruido generado por FWM en el detector WDM se obtiene a partir de la ecuación 27.

Ecuación 27. Potencia de ruido generado por FWM.

$$N_{\text{FWM}} = 2b_{\text{out}}^2 \frac{P_{\text{FWM}}}{8}$$

Donde el parametro b es la eficiencia cuantica del receptor, y la potencia P_{FWM} es la potencia del espúreo generado P_{ijk} [16].

CONCLUSIONES

Se realizó una descripción exhaustiva de los conceptos teóricos y matemáticos que modelan la fibra óptica y el fenómeno no lineal mezcla de cuarta onda FWM, que se presentan en la transmisión de información por fibra óptica.

La mayoría de los fenómenos no lineales, dependen de las características de la fibra óptica y el sistema de transmisión óptico, como la velocidad de transmisión y la potencia de entrada de la señal.

Uno de los parámetros más importante que se deben te-

ner en cuenta en una transmisión por fibra óptica, es el coeficiente de atenuación, ya que este limita la longitud del enlace, reduciendo la potencia óptica y degradando la señal transmitida.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. L. Gómez. “Evaluación de sistemas de comunicaciones ópticas y de radio sobre fibra a través de la caracterización de sus diferentes subsistemas y dispositivos”. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, 2015.
- [2] Juan Pedro Fernández. “Una red todo óptica para los servicios del futuro”. Telos comunicación e innovación, 2015.
- [3] J. F. P. Basto, “Evolution of FTTH Networks for NG-PON2,” PT Inovação e Sist., p. 9, 2014.
- [4] V. E. Bostjan Batagelj and M. A. Jurij Tratnik, Luka Naglic, Vitalii Bagan, Yury Ignatov, “Optical Access Network Migration from GPON to XG-PON,” ACCESS, no. c, pp. 62–67, 2012.
- [5] Henry Anderson Guano Hidalgo. “Estudio y simulación de los efectos no lineales Scattering estimulado de Brillouin y Scattering estimulado de Raman”. Quito, Escuela politécnica nacional, 2013.
- [6] Martínez, B. R. “Introducción a la ingeniería de la fibra óptica”. Wilmington, Delaware: RA-MA Addison Wesley, 1994.
- [7] Boquera, M. Tutorial de comunicaciones ópticas. Recuperado el 03 de Junio de 2015, de <http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm>, julio de 2014.

[8] García, R. A. “Sistemas de comunicaciones ópticas”. Bogotá: Universidad militar nueva granada, 2014.

[9] Horche, P. R. Fundamentos de Comunicaciones Ópticas: Guía de Prácticas. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, 2012.

[10] Agrawal. “Fiber Optic Communication Systems”. USA: Wiley-Interscience, 2002.

[11] Gutiérrez, E. A. “Transmisiones ópticas mediante el uso de solitones”. México D.F.: Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, 2007.

[12] Keiser, G. “Optical Fiber Communications”. McGraw-Hill, 2014.

[13] Ramaswami, R. “Optical Networks”. Kaufman, 2014.

[14] Comunicaciones, G. “Fenómenos no Lineales en Fibras Ópticas”. Universidad de Zaragoza, 2014.

[15] Masabanda. N. “Análisis y simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (rof) a 60ghz”. Quito: universidad politécnica salesiana sede quito, 2013.

[16] Cáceres, J. A. (2013). “modelamiento de un algoritmo para la asignación de longitudes de onda en un multiplexor DWDM minimizando el proceso de mezclado de la cuarta onda FWM (Four wave mixing)”. Redes de ingeniería, p15, 2013.