LINEAR EFFECTS IN AN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM USING THE COARSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TECHNIQUE

EFECTOS LINEALES EN UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO EMPLEANDO LA TÉCNICA MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE ONDA GRUESA

Est. Narly D. Basto Moreno, Est. Cristian D. Calderón Villamizar, MSc. Karla C. Puerto Lopez, PhD. Dinael Guevara Ibarra.

Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería.
Grupo de investigación y desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones (GIDET).
Av. Gran Colombia No. 12E-96, San José de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia.
E-mail: (narlydanneybm, cristiandavidcv, karlaceciliapl, dinaelgi) @ufps.edu.co.

Resumen: En este artículo se presenta el modelado, simulación y evaluación de un sistema de comunicación óptico empleando la técnica de multiplexación por división de onda gruesa. Se presentan las degradaciones que sufre la señal transmitida debido a efectos lineales como son la atenuación y la dispersión cromática; se realizó el modelado de los fenómenos lineales en la herramienta computacional Matlab, operando a 2.5Gbps y con potencia de entrada de 6.3mW, para un enlace de fibra óptica de 30Km, 50Km y 70Km según la recomendación IUT-T G.694.2. En los resultados se obtienen degradaciones que afectan significativamente la señal como: pérdida de potencia la cual se ve reflejada en disminución de amplitud de la señal óptica en un factor de 0.22dB/Km y un ensanchamiento de pulso debido a la dispersión cromática acumulada en el medio de transmisión la cual se incrementa 340 ps/nm cada 20km de longitud de fibra.

Palabras clave: Efectos lineales, CWDM, sistema óptico.

Abstract: This article describes the modeling, simulation and evaluation of an optical communication system applying the coarse wavelength division multiplexing technique. The main objective of this research is to analyze the degradation that suffers the signal due to linear effects such as the attenuation and chromatic dispersion. The modeling of the linear phenomena was done using the Matlab computational tool, operating at 2.5Gbps and with an input power of 6.3mW, for a fiber optic length of 30Km, 50Km and 70Km according to the IUT-T G.694.2 norm. The results show degradations that significantly affect the signal characteristics such as: loss of power which is represented by a decrease of the amplitude of the optical signal by a factor of 0.22dB/km and a pulse widening due to the chromatic dispersion accumulated in the transmission channel which increases 340 ps/nm per 20km of fiber length.

Keywords: linear effects, CWDM, optical system.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el incremento de aplicaciones de banda ancha está generando un creciente interés en la mejora de servicios en hogares y pequeñas empresas de redes (Campos y Rodríguez, 2018). Este incremento de ancho de banda ha generado en gran parte el uso de la fibra óptica como medio de transmisión en un sistema de comunicación, gracias a la gran capacidad que tiene de enviar

información y acceder a servicios de manera simultánea con gran velocidad y calidad (MINTIC).

Con base a lo anterior, un sistema de comunicación óptico con gran capacidad de información requiere de mayor número de canales y una amplia capacidad de ancho de banda para proporcionar velocidad y calidad del sistema. Por lo cual, se emplean técnicas de multiplexación como la CWDM, la cual, se caracteriza por una separación de longitudes de onda de 20nm (o 2.500GHz) en el rango de 1.270 a 1.610 nm pudiendo así transportar hasta 18 longitudes de onda en una única fibra óptica monomodo (UIT.T G694.2, 2003), permitiendo así la transmisión de mayor información y soportando velocidades de canal de hasta 2,5 Gbps sobre distancias de hasta 80 km.

No obstante, al implementar fibra óptica como medio de transmisión para este tipo de sistemas, se presentan errores de origen lineal y no lineal que modifican la señal de información transmitida por el canal óptico, como lo es la atenuación, dispersión, modulación de fase cruzada, modulación de autofase y mezcla de cuarta onda.

Debido a esto, este documento está enfocado en analizar, modelar y simular mediante la herramienta computacional Matlab un sistema de comunicación óptico enfocado en el análisis de los efectos dispersivos de origen lineal, basado en la técnica CWDM. Para la cual, se realizaron simulaciones en el toolbox Simulink para una transmisión de información con potencia de entrada inferior a los 10mW para así tener en cuenta los fenómenos lineales producidos por el canal de transmisión (Gómez, 2015), con espaciamiento entre canales de 2500 GHz y una portadora de radiofrecuencia a 60 GHz teniendo en cuenta la recomendación IUT-T G.694.2. Con longitudes de 30 Km, 50 Km y 70 Km de fibra óptica monomodo estándar teniendo en cuenta la recomendación (UIT-T G652, 2016).

2. SISTEMA ÓPTICO DE COMUNICACIONES

Un sistema óptico de comunicaciones es en esencia un sistema electrónico de comunicaciones que usa la luz como portadora de información (Cabezas y Pinto, 2014). El objetivo de todo sistema de comunicaciones es la transmisión de la mayor cantidad de información en el menor tiempo posible, lo que implica que la investigación en este campo se concentre más en los sistemas de alta velocidad (I. T. d. Aguascalientes, 2014).

Un sistema óptico de comunicaciones está constituido básicamente por tres bloques ilustrados en la figura 1, los cuales son:

A. El transmisor consiste de la interconexión de cuatro bloques básicos. El primer bloque se trata de la interfaz de usuario (analógica o digital), esta interfaz compensa y adapta las impedancias y limita la amplitud de señal de entrada. El segundo bloque es un convertidor de voltaje a corriente. El tercer bloque se trata de una fuente óptica, este bloque realiza la modulación óptica y el último bloque consiste en un acoplador de luz al medio o fibra óptica, su función es acoplar la luz emitida por la fuente e introducirla a la fibra óptica (Tomasi, 2003).

B. El medio o canal por fibra óptica consiste en transportar la señal análoga óptica a su destino.

C. El receptor está constituido por cuatro bloques. El primer bloque es un dispositivo acoplador de la fibra al detector óptico. El segundo bloque se trata de un detector fotoeléctrico, que convierte la energía lumínica en corriente eléctrica. El tercer bloque es un convertidor de corriente a voltaje y el último bloque es una interfaz de usuario destino (Tomasi, 2003).

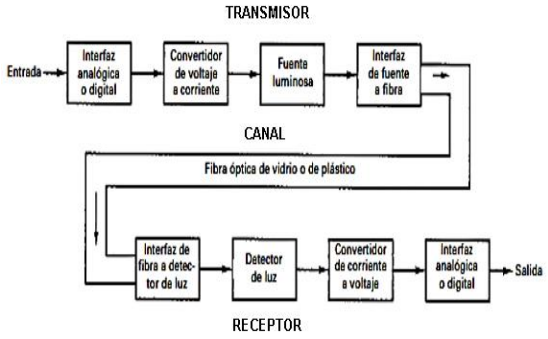


Figura 1. Esquema de comunicación óptica. Fuente: (Tomasi, 2003).

Por otra parte, al realizar una transmisión de datos se presentan ciertos errores, los cuales ocasionan degradaciones de la señal de información transmitida. Estos errores se originan dependiendo de la potencia y velocidad con la que opere el sistema. A pocos niveles de potencia (mW) y velocidades que no superen los 2.5Gbps se presentan errores lineales y a potencias >10mW y velocidades de 10Gbps se presentan los errores no lineales (G. d. C. Ópticas, 2006). Entre los errores lineales se destaca la atenuación y la dispersión Cromática (CD).

La atenuación es cualquier tipo de fenómeno que causa la disminución de la potencia de la señal propagada, pero no afecta su forma. Las pérdidas de potencia causadas por la atenuación incluyen fenómenos basados en el material, relacionados con las propiedades físicas del material del núcleo y las pérdidas de guía de onda resultantes de la estructura de la fibra óptica Las pérdidas de materiales incluyen todo tipo de absorción y dispersión. Las pérdidas de guía de onda son las pérdidas de energía producidas por, falta de uniformidad de la distribución del índice de refracción de la luz en el límite entre el núcleo y el revestimiento o fluctuaciones en el diámetro o la forma de este límite (DELTA).

La Dispersión cromática causa un ensanchamiento del pulso debido a la dependencia que existe entre la longitud de onda con el índice de refracción de la fibra. Esto causa que el pulso aumente su duración temporal a medida que se propaga por la fibra, resultando en una Interferencia Intersimbólica (ISI –Intersymbol Interference–, distorsión de la señal que se manifiesta mediante el ensanchamiento temporal, y el consecuente solapamiento de los pulsos). Esta restricción limita el alcance de la distancia de transmisión sin necesidad de regeneración o de compensación de la dispersión. Dependiendo del tipo de fibra que se utilice y la ventana de operación, el valor de la dispersión puede variar desde 0.5 ps/nm/ km hasta 20 ps/nm/km (López et al., 2011).

En la ecuación 1 se muestra el modelo matemático de la atenuación y dispersión presentes en el medio de transmisión:

$$\frac{\partial E(z,t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}E(z,t) - \frac{i}{2}\beta_2\frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 E(z,t)}{\partial t^3} \quad (1)$$

Efecto Atenuación — Efecto Dispersión

Dónde:

E(z,t): Campo eléctrico.
z: Distancia de propagación.
t: tiempo
α: Coeficiente de atenuación.
β_2: La contante de propagación de segundo orden.
β_3: La contante de propagación de tercer orden.

3. METODOLOGÍA

Para realizar la simulación del sistema de comunicación óptico se emplea el toolbox de Simulink-Matlab, el cual permite construir y simular el modelo del sistema de comunicaciones mediante diagramas de bloques (Díaz y Talero, 2015). El sistema de comunicacion óptico se dividió en tres etapas como se ilustra en la figura 2, definidas como: señal de entrada, medio de transmisión y recepción, las cuales se implementaron a partir de modelos matemáticos.

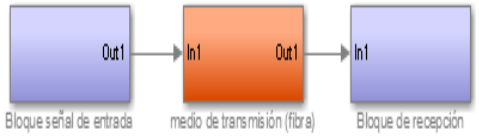


Figura 2. Etapas del Sistema óptico de comunicación en Simulink.
Fuente: Elaboración propia, (Díaz y Talero, 2015).

Para la simulación del sistema óptico se consideraron 5 señales análogas descritas en la tabla I, las cuales se adecuan mediante la modulación de doble banda lateral y se transforman a formato digital con una velocidad de 2,5Gbps, frecuencia de portadora RF a 60 GHz, frecuencias ópticas aplicando la técnica CWDM con espaciados de 20nm teniendo en cuenta la recomendación (UIT-T G694.2, 2003), potencia de salida de 6.3mW y modulación externa con el modulador Mach Zehnder para la conversión electro-óptica.

Tabla 1: Características de las señales generadas por el transmisor.

Señal	1	2	3	4	5
λ (nm)	1511	1531	1551	1571	1591
F_{SMS} (GHz)	3	4	3.5	4.5	5
F_{RF} (GHz)	60	60	60	60	60
F_{OPT} (THz)	198.5	195.9	193.4	190.9	188.5
A_{RF} (V)	1	1	1	1	1
A_{OPT} (V)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Además, se modeló el canal de transmisión teniendo en cuenta la solución analítica de la ecuación no lineal de Schrödinger, en la cual, se ajustan los parámetros de atenuación, dispersión y longitud del enlace de fibra. Para la etapa de recepción se implementó un fotodetector para la

conversión óptica-eléctrica y una serie de filtros que permiten visualizar las señales de información transmitidas.

Por último, para la evaluación del sistema se consideraron distancias de 30Km, 50Km y 70Km, un coeficiente de dispersión de 17ps/nm*Km y un coeficiente de atenuación de 0.22dB/Km para una fibra monomodo estándar regida por la norma (UIT.T G.652, 2016).

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La etapa inicial del sistema se encarga de generar y adecuar la señal óptica para ser transmitida por el canal de transmisión. Como se observa en la figura 3, esta etapa ha sido diseñada por tres sub-sistemas que a través de modelos matemáticos presentan la generación de la señal, la fuente óptica y la conversión electro-óptica.

En el primer sub-sistema denominado como generación de la señal, se expresaron 5 señales (ver tabla 1), moduladas en una subportadora de radio frecuencia de 60 GHz, esta frecuencia debe estar comprendida entre 30 y 300 GHz que es el rango de EHF para la obtención de ondas milimétricas. En el segundo sub-sistema se realiza la conversión electro-óptica, a través del modulador MZM.

Por último, el tercer sub-sistema denotado como fuente óptica, es un láser ideal de fase inicial constante y nula, que tiene como función transportar en frecuencias ópticas la señal RoF, dichas frecuencias fueron seleccionadas según la recomendación (UIT-T G.694.2, 2003), obteniendo un espaciamiento entre canales de 2.500 GHz y una frecuencia central de 193.42 THz, las cuales son multiplexadas e ingresadas en el canal de transmisión.

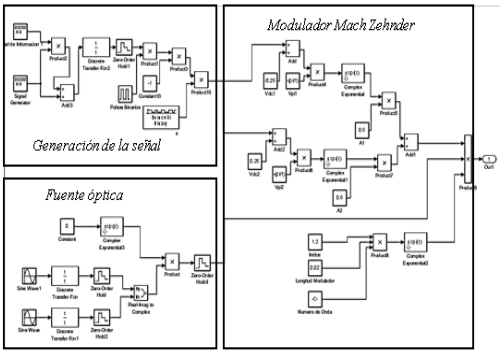


Figura 3. Diagrama de Bloques desarrollado en Simulink para la etapa de señal de entrada. Fuente: Elaboración Propia.

La segunda etapa del sistema representa el medio de transmisión por fibra óptica, ilustrada en la Figura 4; en la cual se realiza la transmisión de la señal análoga óptica hacia el receptor. Para la realización de esta etapa se simuló el modelo matemático que rige el comportamiento de una fibra monomodo estandarizada por la norma (UIT-T G.652, 2016), donde los parámetros de simulación utilizados son ilustrados en la Tabla 2.

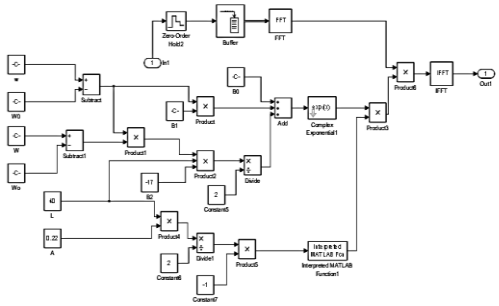


Figura 4. Diagrama de Bloques desarrollado en Simulink para el medio de transmisión. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2: Parámetros de Simulación del medio de transmisión implementado en el toolbox Simulink.

Parámetro	Valor
Longitud de fibra óptica	30,50 y 70 Km
Velocidad de transmisión	2,5Gbps
Coeficiente de dispersión	-17 (ps/nm*Km)
Coeficiente de atenuación	0.22dB/Km

La etapa final representa la etapa de recepción del sistema, ilustrada en la figura 5; la cual se encarga de recibir la señal después de propagarse a través del canal óptico. Para llevar a cabo este módulo receptor se emplea un elemento denominado fotodetector.

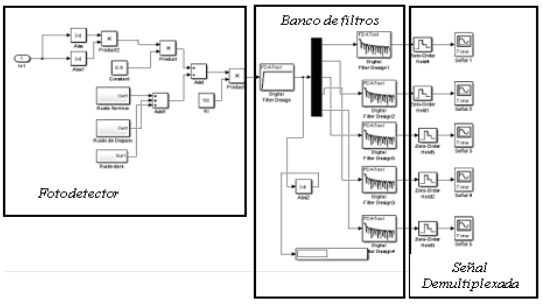


Figura 5. Diagrama de Bloques desarrollado en Simulink para la etapa de Recepción de la señal. Fuente: Elaboración Propia.

La implementación del fotodetector en el entorno de Simulink se realizó teniendo en cuenta los parámetros de simulación ilustrados en la tabla 3, adicionando fuentes de ruido encargadas de realizar la conversión opto-eléctrica.

Tabla 3: Parámetros del fotodetector implementado en Simulink.

Parámetro	Valor
Responsividad	0.8A/W
Resistencia de carga	50Ω
Ancho de banda del receptor	10.5GHz
Temperatura	293ºK
Idark	10nA
Corriente térmica (I_{TERM}^2)	1.69908942x10-10
Corriente de disparo (I_{SHOT}^2)	1.4285x10-12
Constante de Boltzman (Kg)	1.3807x10-23

Adicionalmente, se agregó una serie de filtros los cuales permiten visualizar las señales de información transmitidas y eliminar las diferentes interferencias causadas desde la etapa de la generación de la señal, el canal óptico y los ruidos agregados en el módulo receptor. En la tabla 4 se ilustran las características de los filtros implementados en bloques de "Filter Design & Analysis Tools" en el toolbox Simulink.

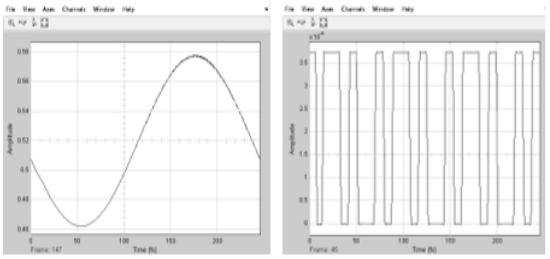
Tabla 4: Características de los filtros implementados en Simulink.

Parámetro	Filtro 1	Filtro 2
Tipo	Pasa-Alta	Pasa-Baja
Tipo de ventana	Triangular	Triangular
Orden del filtro	50	50
Frecuencia de Corte	50 GHz	3 GHz 3.5 GHz 4 GHz 4.5 GHz 5 GHz

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación del sistema de comunicación óptico para tres diferentes tramos de longitud de fibra, donde se observa cómo afecta la atenuación y dispersión cromática en una señal eléctrica producida por el canal de transmisión.

En la figura 6 se representa la señal óptica multiplexada en formato análogo y digital a la salida del transmisor en el dominio del tiempo, las cuales, se determinaron a partir de 5 señales establecidas en la Tabla I con una frecuencia central de 193.42 THz.



a) Señal análoga b) Señal digital

Figura 6. Señal óptica multiplexada en formato análogo y digital a la entrada del medio de transmisión.
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 7 se representa el espectro de frecuencia por medio de "Spectrum Analyzer" del toolbox Simulink de Matlab, observando el nivel de potencia de la señal a 6.3mW, permitiendo analizar los efectos lineales presentes en el medio de transmisión.

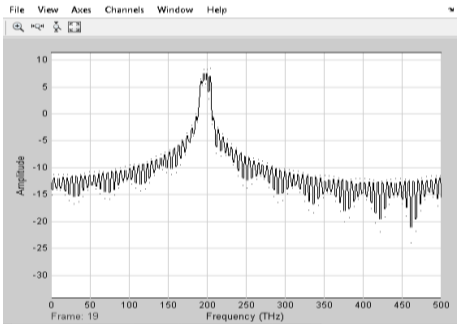


Figura 7. Espectro de frecuencia de la señal óptica multiplexada a la entrada del medio de transmisión.
Fuente: Elaboración Propia.

A. Análisis para una longitud de fibra de 30 km.

En la figura 9 se ilustra la señal óptica digital obtenida a la salida del medio de transmisión mostrando la deformación producida por la dispersión cromática presente en el medio, donde se evidencia un ensanchamiento en los pulsos respecto a los pulsos de entrada con un valor de 510 ps/nm a esta distancia.

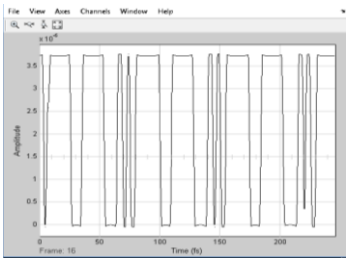


Figura 9. Señal digital a la salida del medio de transmisión para una longitud de fibra de 30km. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 10 se ilustra la señal de frecuencia central captada por el modulo receptor a 30 km de longitud de fibra óptica, la cual, se encuentra degradada en un factor de atenuación de 0.22 dB/ Km. Las señales restantes enviadas por el medio, son captadas por el receptor a diferentes frecuencias de operación y presentan la misma forma que la señal central, debido a que el proceso de conversión óptico-eléctrico y el medio de transmisión es el mismo.

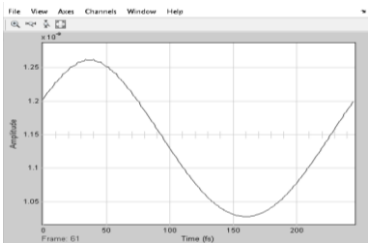


Figura 10. Señal eléctrica captada en el receptor a una longitud de fibra óptica de 30km. Fuente: Elaboración Propia.

B. Análisis para una longitud de fibra de 50 km.

En la figura 11 se ilustra la señal óptica digital obtenida a la salida del medio de transmisión mostrando la deformación producida por la dispersión cromática presente en el medio, donde se evidencia un ensanchamiento en los pulsos respecto a los pulsos de entrada con un valor de 850 ps/nm a esta distancia.

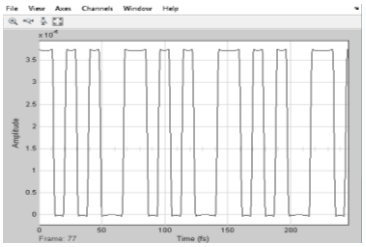


Figura 11. Señal digital a la salida del medio de transmisión para una longitud de fibra de 50km. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 12 se ilustra la señal de frecuencia central captada por el modulo receptor a 50 km de longitud de fibra óptica, la cual, se encuentra degradada en un factor de atenuación de 0.22 dB/ Km. Las señales restantes enviadas por el canal, son captadas por el receptor a diferentes frecuencias de operación y presentan la misma forma que la señal central, debido a que el proceso de conversión óptico-eléctrico y el medio de transmisión es el mismo.

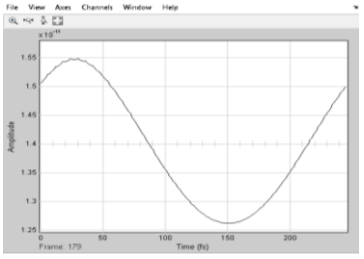


Figura 12. Señal eléctrica captada en el receptor a una longitud de fibra óptica de 50km. Fuente: Elaboración Propia.

C. Análisis para una longitud de fibra de 70 km.

En la figura 13 se ilustra la señal óptica digital obtenida a la salida del medio de transmisión mostrando la deformación producida por la dispersión cromática presente en el medio, donde se evidencia un ensanchamiento en los pulsos respecto a los pulsos de entrada con un valor de 1190 ps/nm a esta distancia.

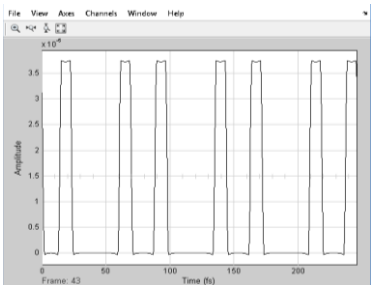


Figura 13. Señal digital a la salida del medio de transmisión para una longitud de fibra de 70km. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 14 se ilustra la señal de frecuencia central captada por el modulo receptor a 70 km de longitud de fibra óptica, la cual, se encuentra degradada en un factor de atenuación de 0.22 dB/ Km. Las señales restantes enviadas por el canal, son captadas por el receptor a diferentes frecuencias de operación y presentan la misma forma que la señal central, debido a que el proceso

de conversión óptico-eléctrico y el medio de transmisión es el mismo.

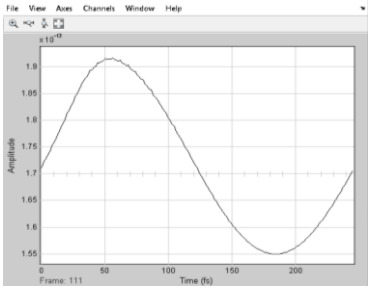


Figura 14. Señal eléctrica captada en el receptor a una longitud de fibra óptica de 70km. Fuente: Elaboración Propia.

Al analizar los resultados obtenidos se tiene que para una potencia de entrada de 6.3 mW a distancias de 30, 50 y 70 km la señal transmitida se encuentra degradada en amplitud por un factor de 0.22 dB/ Km y deformada por la dispersión acumulada presente en el medio de transmisión por fibra óptica, la cual es directamente proporcional a la longitud de la fibra óptica y se incrementa en un factor de 17 ps/ nm* Km.

6. CONCLUSIONES

Al implementar el sistema en general se realizan las simulaciones correspondientes a cada etapa en las cuales se observa como la señal original es degradada desde la etapa del medio de transmisión hasta la etapa receptora debido a los procesos implementados. Se observó como la atenuación es una de las degradaciones que afecta significativamente la amplitud de la señal óptica en la salida con un factor de 0.22dB/km la cual se ve degradada 6dB cada 20 km de longitud, debido a esto se recomienda realizar una etapa de amplificación óptica la cual permita recuperar la señal enviada y así transmitir una señal lo más cercana posible a la original.

Así mismo, se evidencia como la dispersión cromática presente en el medio de transmisión afecta la señal óptica transmitida provocando un ensanchamiento de pulso debido a la dispersión acumulada en el canal la cual se incrementa 340 ps/nm cada 20km de longitud de fibra. De igual forma se cumplió con la tasa de error de Bit de 10-12 con una distancia máxima de 70 km, proporcionando gran utilidad a la herramienta de simulación Matlab para sistemas de comunicaciones ópticas, la cual se basó en el análisis de los efectos dispersivos de origen lineal para un sistema de comunicación óptico empleando la técnica multiplexación por división de onda.

REFERENCIAS

Campos C. y Rodríguez P. (2018). *Análisis comparativo de sistemas CWDM en función del tipo de fuente y fibra empleada*.

MINTIC. *ABC de la fibra óptica*. http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-article-5342.html. (Consultado: 10 de mayo de 2018).

Recomendación UIT-T G694.2. (2003). *Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda*.

Gomez F. (2015). *Efecto no lineal mezcla de cuarta onda (fwm) en transmisión por fibra óptica.* San José de Cúcuta.

Recomendacion UIT-T G652. (2016). *Características de las fibras y cables ópticos monomodo*.

Cabezas A. F. y Pinto R. A. (2014) *Sistemas de comunicaciones ópticas*, Primera edición, Bogotá.

I. T. d. Aguascalientes. (2014). *Comunicaciones Ópticas.*https://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-6/. (Consultado:11 de mayo de 2018).

Tomasi W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, Prentice Hall, Cuarta edición, México.

G. d. C. Ópticas. (2006). *Tutorial de Comunicaciones Ópticas.*http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_6_1.htm. (Consultado: 11 de mayo de 2018).

DELTA. *Atenuación de la fibra óptica.* https://shopdelta.eu/atenuacion-de-la-fibra-optica_l6_aid811.html. (Consultado: 11 de mayo de 2018).

López J. G., Toledo A., Ordóñez H. y Agredo J. P. (2011). "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM". Revista facultad de Ingeniería, UPTC, vol. 20, no. 31, pp. 23-35.

Diaz C. y Talero N. B. (2015). "Análisis de Propagación electromagnética en espacios cerrados: herramienta software en Matlab para predicción y simulación". Revista Colombiana en Tecnologias Avanzadas, vol. II.

R. J. Millán. (2006). *CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing).* https://www.ramonmillan.com/tutoriales/coarsewavelengthdivisionmultiplexing.php. (Consultado: 11de mayo de 2018).

Meza J. A. (2009). "CWDM tecnología y aplicaciones", Tesis de grado, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Fragnito H. (2005). *Fundamentals of Fiber-Optic Communication Systems*. Kyatera, Instituto de Física GlebWataghin, Campinas, Brasil.

Pérez A. L. (2014). "Diseño, análisis y simulación de enlaces ópticos que utilizan Multiplexación por División en Longitudes de Ondas a través de la práctica de laboratorio", Tesis de Pregrado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara.