

Compensación de la dispersión cromática presente en la fibra óptica utilizando métodos de ecualización

Chromatic dispersion compensation present in the fiber optics using equalization methods

José Eduardo Santos Correa*
Karla Cecilia Puerto López**
Dinael Guevara Ibarra***

RESUMEN

En este trabajo se utilizó una herramienta computacional en el área de las telecomunicaciones para simular un sistema de comunicaciones ópticas, para evaluar y compensar las degradaciones sufridas a la señal debidas al efecto lineal de la dispersión cromática. Este efecto se produce debido a la variación del índice de refracción de un medio óptico con la longitud de onda, causando un ensanchamiento en los pulsos distorsionándolos de tal forma que se produzca la interferencia entre símbolos y limitando la velocidad de transmisión. Se utilizó una fibra óptica monomodo estándar la cual es un medio de transmisión capaz de transmitir gran cantidad de datos y con niveles de baja atenuación. Se simularon dos ecualizadores con el fin de compensar dichas degradaciones generadas por la dispersión cromática, los cuales fueron: el ecualizador de alimentación hacia adelante y el conjugador de fase óptica, donde se corrigió con éxito la interferencia entre símbolos generada por la dispersión cromática.

Palabras claves: Interferencia entre símbolos, ISI, fibra óptica monomodo, dispersión cromática

ABSTRACT

In this paper, it was employed a computational tool in the area of telecommunications to simulate an optical communication system, in order to evaluate and compensate degradations occurred on the signal by the linear effect of chromatic dispersion. This effect is yielded by the variation of refractive index in an optical medium with wavelength, causing a widening in the pulse and distorting them so that inter-symbol interference occurs, which limits the transmission speed. A single mode standard optical fiber was employed, which is a transmission mean capable of transmitting a large amount of data with low attenuation levels. Two equalizers were simulated with the final purpose of compensating these degradations due to chromatic dispersion, which were: the feed forward equalizer and the optical phase conjugator, where inter-symbol interference generated by chromatic dispersion was successfully corrected.

Keywords: Inter-symbol Interference, ISI, Single-mode optical fiber, Chromatic dispersion

Como citar este artículo:

J. E. Santos Correa, K. C. Puerto López, D. G. Ibarra, "Compensación de la dispersión cromática presente en la fibra óptica utilizando métodos de ecualización". *Ingeniare*, N° 21, pp. 13-32, 2016.

* Coinvestigador. Universidad Francisco De Paula Santander. Cúcuta. Colombia. joseeduardosc@ufps.edu.co. Grupo De Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones. Línea de investigación Sistemas de Comunicaciones.

** Investigador principal. Ingeniera Electrónica. Especialista en Servicios y Redes en Telecomunicaciones. Magíster en Ingeniería en Telecomunicaciones. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta. Colombia. karlaceciliapl@ufps.edu.co. Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones. Línea de investigación Sistemas de Comunicaciones.

*** Coinvestigador. Ingeniero Electricista. Doctor en Ingeniería área Telecomunicaciones. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta. Colombia. dinaelgi@ufps.edu.co. Grupo de Investigación de Desarrollo en Telecomunicaciones. GIDT. Línea de investigación Sistemas de Comunicaciones.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la humanidad se encuentra en un periodo liderado por las comunicaciones en tiempo real y formato digital, donde ha sido necesario implementar medios de transmisión que puedan proporcionar un gran ancho de banda en las comunicaciones; la fibra óptica ha emergido como el medio más óptimo para emplearse, pues se ha destacado por ser capaz 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 una gran fiabilidad [1].

En un principio 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 hasta el hogar a través de la red de acceso a servicios, conocidos como fibra hasta el hogar (*Fiber to the Home*, FTTH) [2]. Para poder realizar el despliegue de acceso mediante FTTH se utilizan diversas tecnologías disponibles y topologías implementadas; una de estas tecnologías son las redes pasivas con capacidad de Gigabit (*Gigabit-capable Passive Optical Network*, XGPON), las cuales son redes de fibra óptica cuyos componentes son enteramente pasivos en la red de distribución, alcanzando velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps [2]. Esta tecnología se encuentra definida por las recomendaciones IUT-T G.987 de la unión internacional de telecomunicaciones (*International Telecommunication Union*, ITU) [2]-[3].

El incremento del ancho de banda requerido por los sistemas de comunicaciones al utilizar la tecnología XGPON y redes de acceso FTTH requieren usar largas distancias. Por ende, han conllevado a que los fenómenos lineales como la atenuación y la dispersión cromática degraden considerablemente la información que es enviada [4], donde la dispersión ocurre por la variación del índice de refracción de un medio óptico con la longitud de onda causando un ensanchamiento en los pulsos; este ensanchamiento llega a tal punto que se genera una interferencia entre símbolos (*Intersymbol Interference*, ISI) y limitando la velocidad de transmisión [4].

Con el fin corregir este error lineal generado en la fibra óptica han surgido diversos estudios y se han implementado diferentes métodos; como en la Universidad Politécnica de Valencia de España [5], donde con el fin de estudiar los efectos no lineales en dispositivos fotónicos utilizan el conjugador de fase óptica (*Optical Phase Conjugation*, OPC) y por medio del OPC tratar la dispersión cromática, lo cual consiste en invertir la fase con la cual se propaga la luz en la fibra óptica y de esta forma reducir la afectación del error de la dispersión cromática. En la Universidad del Cauca, Colombia [6], se desarrolló un estudio sobre las diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la dispersión cromática en redes WDM, explicando en qué consiste el uso de compensadores electrónicos, en donde se utilizó el ecualizador de alimentación hacia adelante (*Feed Forward Equalization*, FFE) el cual cuenta con la optimización del criterio de minimización del error cuadrático medio MMSE para corregir la interferencia entre símbolos. En la Universidad Francisco de Paula Santander [7], se realizó un estudio sobre el desempeño de dos ecualizadores digitales basados en el criterio de minimización del error cuadrático medio,

en sistemas de comunicaciones ópticas para mitigar los efectos causados por la dispersión cromática; saber que método es más eficiente es de importancia para mejorar la calidad de información y la certeza al momento de escoger que método es el mejor para corregir la dispersión cromática.

Por consiguiente, este documento está enfocado en realizar un análisis entre dos ecualizadores, el conju-gador de fase óptica y el ecualizador de alimentación hacia adelante con el fin de mitigar la interferencia entre símbolos producida por la dispersión cromática, utilizando simulaciones con una herramienta com-putacional en el área de las telecomunicaciones, para una transmisión de información con potencia de entrada del láser de 4 mW, donde se usa este valor para no tener en cuenta los fenómenos no lineales que son producidos por altas potencias [8]. Para un tramo de enlace de fibra óptica de 40 km y 80 km, teniendo en cuenta la recomendación ITU-T G.659.

2. METODOLOGÍA

Para simular la comunicación óptica en la generación y transmisión de la información se usó el modelo de un generador de secuencia binaria aleatoria, el cual da como resultado una trama lógica de bits con una velocidad de transmisión de 10 Gbps, posteriormente pasa por un generador de señal eléctrica, el cual convierte la señal lógica en una señal eléctrica cuadrada con no retorno a cero (No return to zero, NRZ), siendo esta la información a enviar utilizando un láser CW (Continuous Wave) para producir la señal óptica con una longitud de onda de operación de 1550 nm a una potencia de 4 mW; se utiliza un tipo de modulación MachZehnder en el emisor, dando como resultado una señal de entrada como se muestra en la figura 1 y 2.

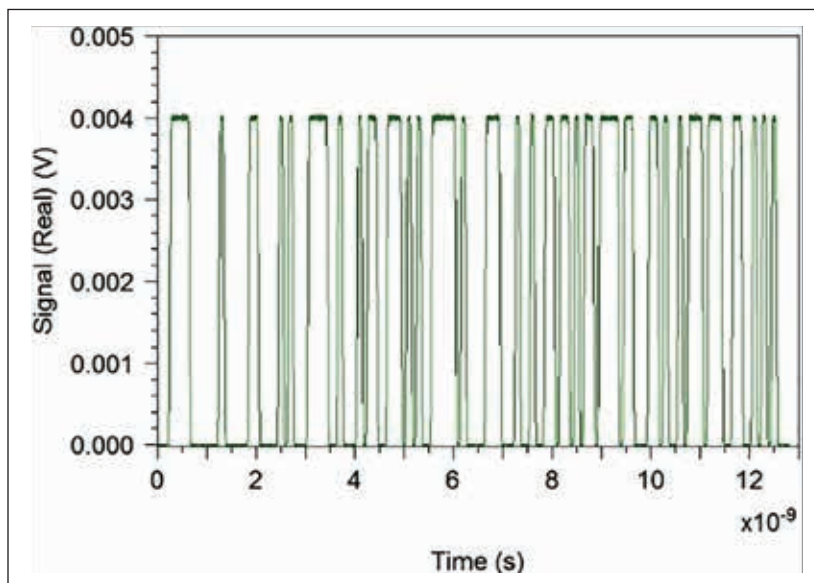


Figura 1. Señal de entrada

Fuente: Elaborado por los autores

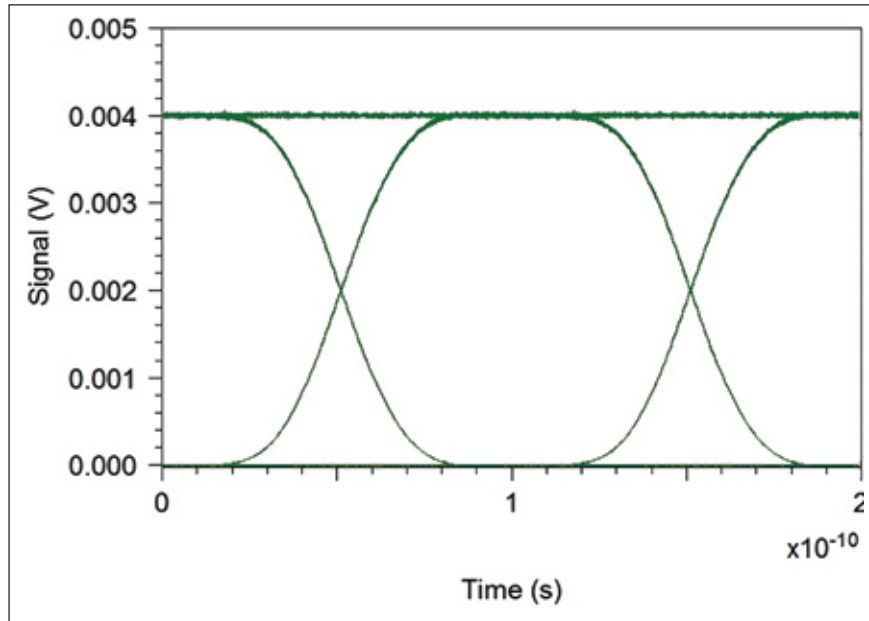


Figura 2. Diagrama de ojo en la entrada del sistema

Fuente: Elaborado por los autores

La fibra óptica que se utilizó como medio de transmisión está basada en la norma ITU-T G.652, la cual tiene un coeficiente de dispersión de 17 ps/nm*km y un coeficiente de atenuación de 0.21 dB/km. La propagación por el medio óptico se modela mediante la ecuación no lineal de Schrödinger:

$$\frac{\partial Y(z, t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} Y(z, t) - j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 Y(z, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

Debido a que en este estudio solo se analiza el efecto de la dispersión cromática no se tiene en cuenta que se utiliza para modelar los efectos no lineales que presenta la comunicación por fibra óptica.

El modelamiento de la dispersión cromática en la herramienta computacional parte de la ecuación (1), donde la constante de propagación que es el término que indica como viaja la fase en función del espacio, se expresa con la letra β [4].

Si la frecuencia portadora $\omega_0 \gg$ Symbol, siendo las frecuencias que toma la señal en el equivalente paso bajo, se puede considerar el siguiente desarrollo en serie de Taylor para la constante de propagación β :

$$\begin{aligned} \beta(\omega) \approx & \beta(\omega_0) + \frac{\partial \beta}{\partial \omega}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} \\ & + \frac{\partial^3 \beta}{\partial \omega^3}(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^3}{6} + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Donde los términos mayores de β_3 de la serie no tienen relevancia para este estudio, cada uno de los tres términos son distintivos y se destacan los siguientes:

$$\beta_0 = \beta(\omega_0) \tag{3}$$

$$\beta_1 = \frac{\partial \beta}{\partial \omega}(\omega_0)(\omega - \omega_0) \tag{4}$$

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} \tag{5}$$

β_0 es el término que indica la constante de propagación de la portadora que da la velocidad de fase, entendida como la velocidad con que se propaga la fase de una onda en el espacio [7]. El segundo término β_1 es el retardo de grupo a una frecuencia ω , dado que el retardo de grupo se define como el retardo por unidad de longitud que tiene la envolvente, su expresión es la derivada de $\beta(\omega)$ [7]. Los términos mayores a β_1 hacen referencia a la dispersión de la señal, siendo β_2 el más relevante y de interés para este estudio, donde v_g es la velocidad de grupo definida como:

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega}\right)^{-1} \tag{6}$$

Así, la dependencia frecuencial de la velocidad de grupo provoca un ensanchamiento del pulso debido a que las diferentes componentes espectrales del pulso se dispersan durante la propagación y no llegan simultáneamente al final de la fibra [4]. Si $\Delta\omega$ es la anchura espectral del pulso, el grado de ensanchamiento tras propagarse por una fibra de longitud L viene dado por:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial \omega} \Delta\omega = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{L}{v_g}\right) \Delta\omega = L \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \tag{7}$$

En términos de longitud de onda, se tiene que $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda^2}$ y $\Delta\omega = \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right) \Delta\lambda$, por lo que el grado de ensanchamiento del pulso se puede escribir como:

$$\Delta T = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{L}{v_g}\right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda \tag{8}$$

Donde,

$$D = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{v_g}\right) = \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right) \beta_2 \tag{9}$$

Siendo D el parámetro de dispersión el cual suele expresarse en ps/km*nm [4].

Para la recepción de la señal de información se utilizó el modelo de un receptor el cual se compone de un fotodetector que convierte una señal óptica a una corriente eléctrica, esta fotocorriente pasa a un modelo de un preamplificador que la convierte en un voltaje. Por último, pasa por el modelo de un

post-amplificador que contiene un conjunto de filtros de banda base que dan forma a las ondas de salida eliminando el ruido que se genera al usar el fotodetector, y de esta forma obtener una señal eléctrica.

Ahora para realizar la compensación de la dispersión cromática se utilizaron dos ecualizadores basados en métodos de ecualización: el OPC y el FFE, analizados a dos distancias de 40 km y 80 km.

Conjugador de fase óptica

Para compensar el error que produce la dispersión cromática usando el conjugador de fase óptica se utilizó la configuración MSSSI (Mid-Span Spectral Inversion), la cual consiste en ubicar el OPC en la mitad de la transmisión del canal, recibiendo una señal óptica e invirtiendo su fase para que posteriormente se propague por la otra mitad de la fibra con una longitud igual, como se muestra en las figuras 3 y 4 [5].

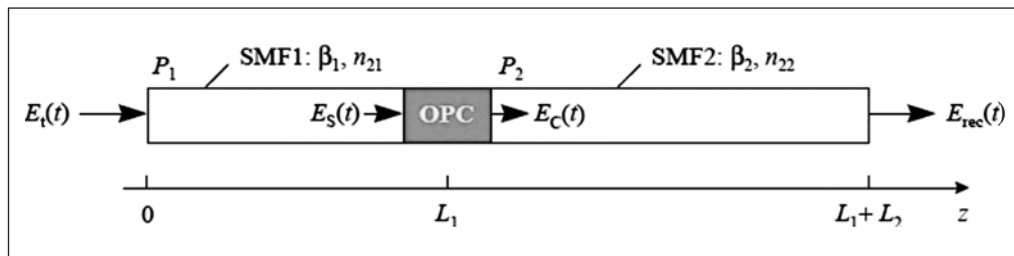


Figura 3. Modelo de sistema de comunicaciones ópticas que emplea la técnica OPC.

Fuente: Tomada de [5]

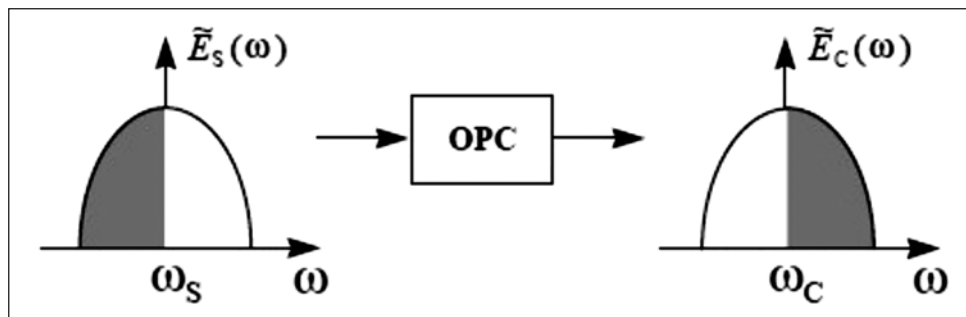


Figura 4. Diagrama esquemático del proceso de conjugación de la señal óptica denominado inversión espectral

Fuente: Tomada de [5]

Donde la compensación al utilizar esta configuración se da, si se cumple con la siguiente ecuación:

$$L_1 \frac{\partial^2 \beta_1(\omega_s)}{\partial \omega^2} = \beta_{21} L_1 = \beta_{22} L_2 = L_2 \frac{\partial^2 \beta_2(\omega_c)}{\partial \omega^2} \quad (10)$$

Es decir, la dispersión cromática que sufre la señal en ambas fibras debe ser idéntica.

Ecualizador de alimentación hacia adelante

Para compensar el error que produce la dispersión cromática usando el ecualizador de alimentación hacia adelante el cual se compone de la siguiente topología ilustrada en la figura 5.

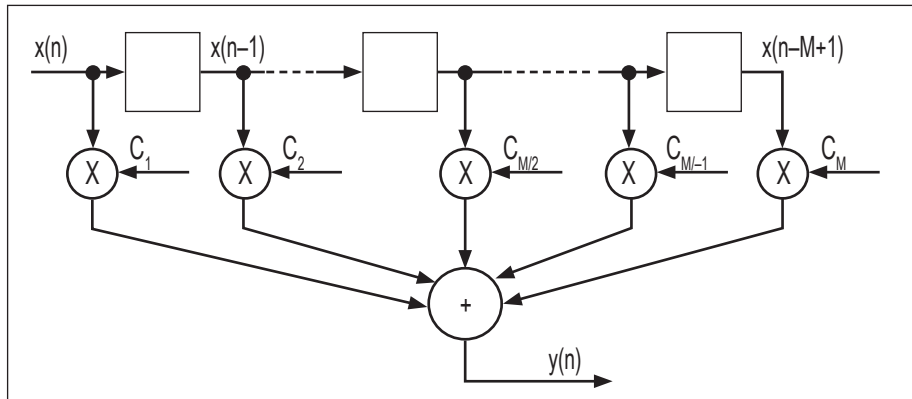


Figura 5. Diagrama de bloques de un FFE

Fuente: ITU-T G.667

Del diagrama de bloques de un FFE se puede sacar la relación de entrada / salida con la siguiente ecuación:

$$y(nT) = \sum_{i=1}^M C_i * x((n + 1 - i)T) \tag{11}$$

Donde $x(n)$ y $y(n)$ son las señales de entrada y salida respectivamente; C_i son los coeficientes de ponderación o los grifos y M es el número de taps, donde el número de taps hace referencia a la cantidad de retardo que se aplica a una señal y el filtrado que puede hacerse; estos son representadas como unidades de retardo en función del periodo de bit. Las señales retardadas se multiplican por coeficientes ajustables y finalmente sumados en conjunto [9].

Para realizar la compensación utilizando un FFE se emplea la técnica de post-compensación electrónica y usando 9 taps, el valor definido del número de taps se fundamenta en estudios concernientes a las técnicas de compensación electrónicas para la dispersión cromática y por la norma ITU-T G.667 [6].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis para una distancia de 40 km

A continuación, se realizan las simulaciones para un enlace con una distancia de 40 km. Para ello se determina la dispersión acumulada a la salida de la señal transmisora y la tasa de error de bits que lleva esa señal transmisora. En la tabla 1, se aprecian los resultados de los parámetros anteriormente mencionados.

Tabla 1. Parámetros para 40 km

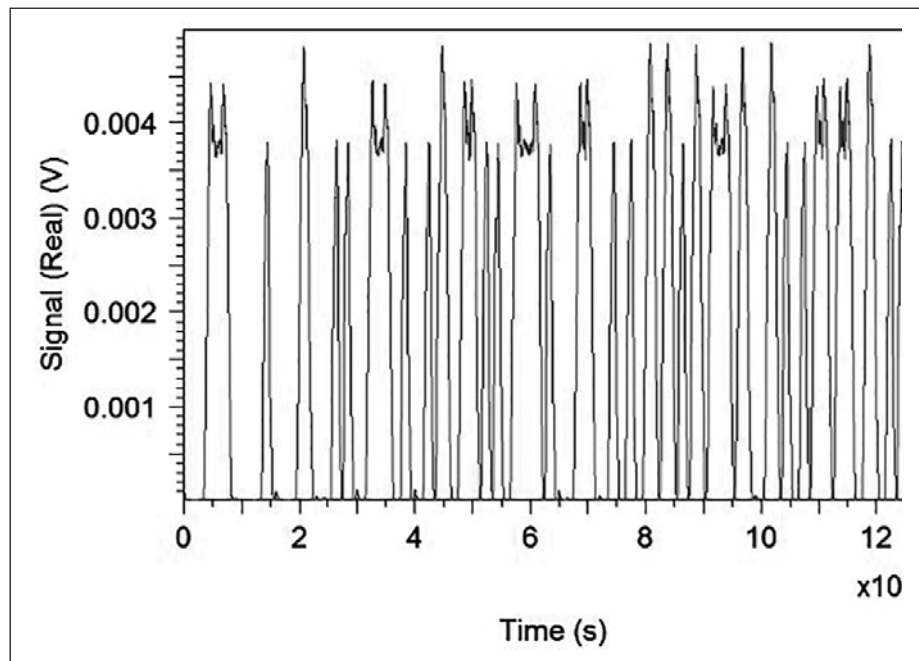
Potencia (mW)	Dispersión acumulada (ps/nm)	BER
4mW	657.33	9.5848e-020

Para descartar las pérdidas de potencia por atenuación del sistema se usa un amplificador óptico dopado con erbio al cual se le halla la ganancia con la siguiente ecuación:

$$G = \alpha * L \quad (12)$$

Donde G es la ganancia del amplificador, α la atenuación en dB/km de la fibra óptica y L la distancia en km, de esta forma se obtiene que para un sistema de 40 km con una atenuación de 0.21 dB/km se utiliza un amplificador de 8.4 dB de ganancia [10].

Analizando los resultados de la tabla 1 se comprueba cómo afecta el fenómeno de la dispersión cromática a la señal mediante el parámetro de la dispersión acumulada, y a pesar de la incidencia del error, la tasa de error de bits no es lo suficientemente alta para que el receptor no pueda recibir la señal, debido a que la mayoría de los sistemas ópticos exigen para su operación una tasa de error de bits (*Bit-Error Rate*, BER) de $10e-9$, e incluso a veces se requiere un BER más pequeño del orden de $10e-14$ [8].

**Figura 6. Señal de salida a 40 km**

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 6 se presenta la señal de salida de la comunicación óptica a 40 km, en la cual se puede observar claramente la distorsión generada por la dispersión cromática en los picos de la señal y la interferencia entre símbolos que se puede apreciar en el intervalo de tiempo de 8×10^{-9} y 10×10^{-9} .

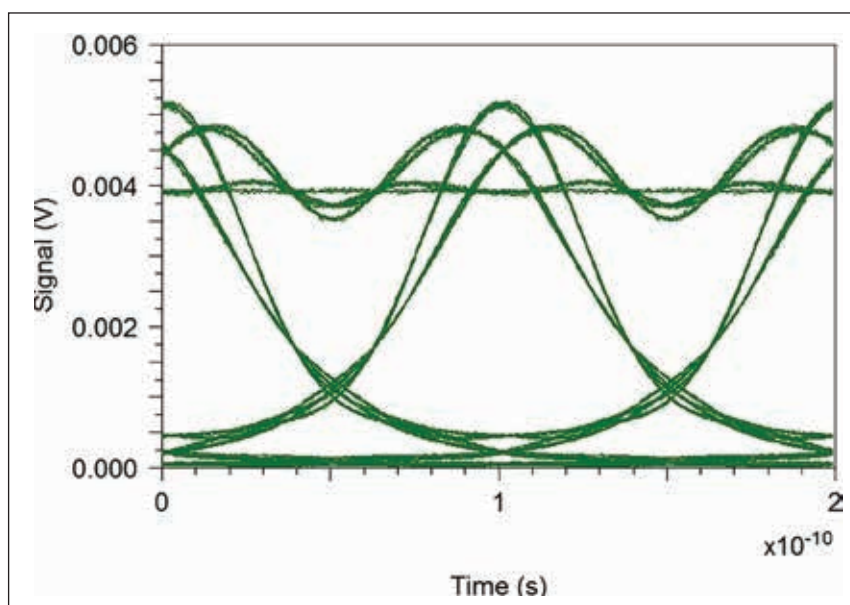


Figura 7. Diagrama de ojo en la salida del sistema a 40 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 7 se presenta el diagrama de ojo de la señal transmitida a una distancia de 40 km, se evidencia la degradación de la señal generado por la dispersión cromática, el diagrama de ojo se ve afectado tanto por la interferencia entre símbolos y las deformaciones en amplitud de la señal.

- **Compensación mediante ecualizador FFE**

A continuación, se realizan las simulaciones para compensar el error que produce la dispersión cromática utilizando un FFE, recibiendo una señal eléctrica como se observa en la figura 6, la cual pasa por el ecualizador con 9 taps para posteriormente salir como una señal eléctrica ecualizada como se puede apreciar en la figura 8.

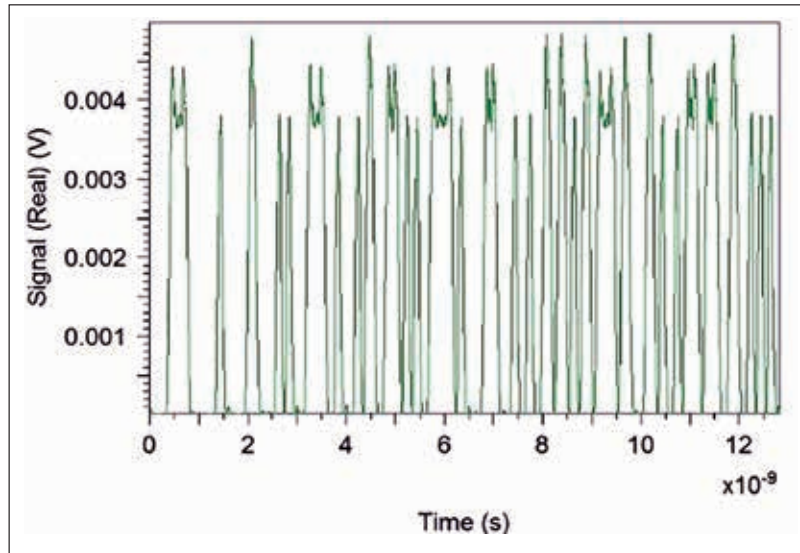


Figura 8. Señal compensada por el FFE a 40 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 8 se presenta la señal de salida de la comunicación óptica a 40 km y pasando por un FFE, en el cual se puede observar que se ha podido corregir con éxito la interferencia entre símbolos, pero la distorsión generada por la dispersión cromática en los picos de la señal no se obtuvo una corrección apropiada; la medida de la tasa de error de bits que se presenta al utilizar el FFE es de $2.9217e-190$ lo que da a entender que la transmisión de bits es buena [8].

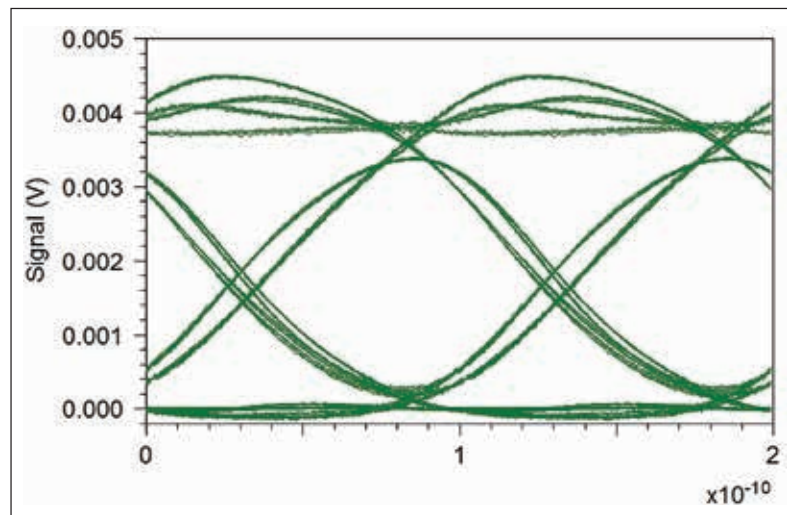


Figura 9. Diagrama de ojo después de aplicar el FFE a 40 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 9 se presenta el diagrama de ojo de la señal transmitida a una distancia de 40 km y pasando por el FFE, se evidencia que a pesar de corregir la interferencia entre símbolos la señal sigue estando bastante afectada por las distorsiones en amplitud sufridas por la dispersión cromática.

- **Compensación mediante el conjugado de fase óptica**

A continuación, se realizan las simulaciones para compensar el error que produce la dispersión cromática empleando el conjugador de fase óptica donde $L1 = 20\text{km}$ y $L12 = 20\text{km}$, ambas fibras manejan los mismos coeficientes de dispersión para cumplir con la ecuación 10 y para cada uno de los casos se utilizan un amplificador dopado con erbio de ganancia 4.2 dB debido a que ya no es un tramo de fibra de 40 km si no dos tramos de fibra de 20 km.

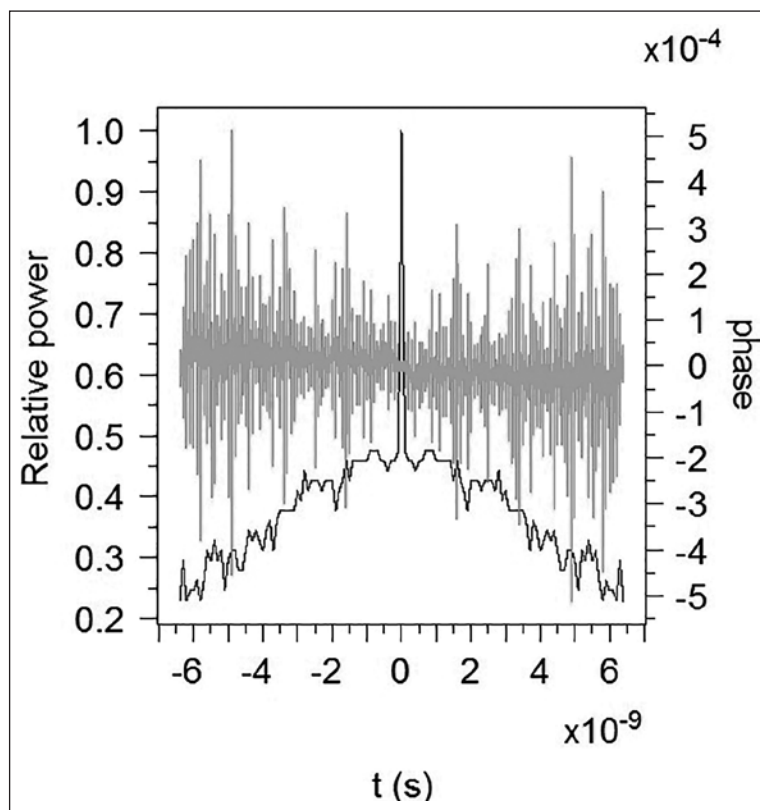


Figura 10. Fase óptica vs potencia a 20 km antes del OPC

Fuente: Elaborado por los autores

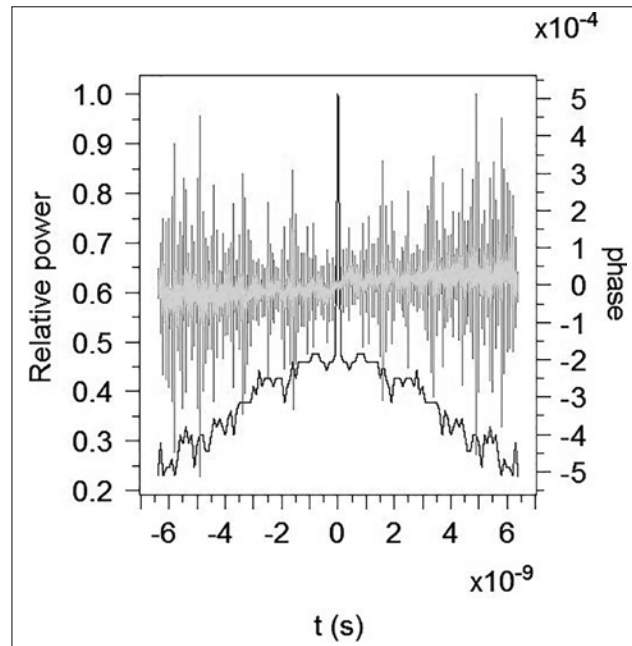


Figura 11. Fase óptica vs potencia a 20 km después del OPC

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 10 se presenta la fase óptica vs potencia que lleva la señal de transmisión antes de entrar al conjugador de fase y en la figura 11 se muestra la fase conjugada de la señal de transmisión, se evidencia que al pasar por el conjugador solo afecta la fase de la señal sin agregarle alguna otra distorsión al sistema.

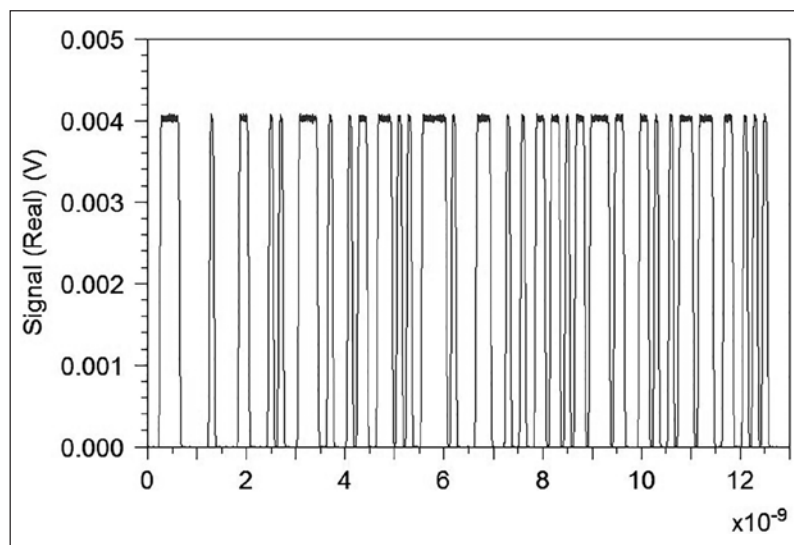


Figura 12. Señal compensada por el OPC a 40 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 12 se presenta la señal de salida de la comunicación óptica a 40 km utilizando un OPC para compensar los errores generados por la dispersión cromática, en la cual se puede observar que se ha podido corregir con éxito las distorsiones producidas por la dispersión cromática en su totalidad a 40 km, la medida de la tasa de error de bits que se presenta al utilizar el OPC es de 0 lo cual indica que de todos los bits enviados no hay probabilidad que ninguno salga erróneo.

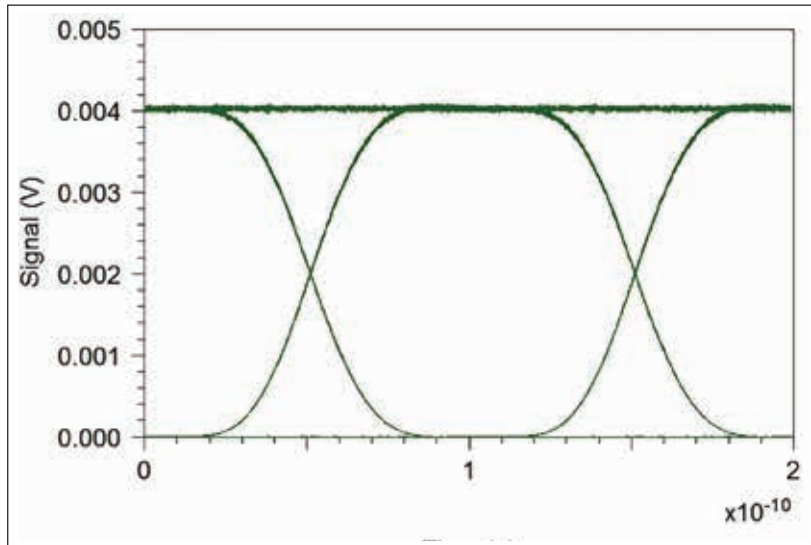


Figura 13. Diagrama de ojo despues de aplicar el OPC a 40 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 13 se presenta el diagrama de ojo de la señal transmisora a una distancia de 40 km y pasando por el OPC, se evidencia un diagrama de ojo sin ninguna distorsión.

3.2. Análisis para una distancia de 80 km

Por último, se realizan las simulaciones para un enlace con una distancia de 80 km. Para ello se determina la dispersión acumulada a la salida de la señal transmitida y la tasa de error de bits que lleva dicha señal. En la tabla 2 se aprecian los resultados de los parámetros anteriormente mencionados.

Tabla 2. Parámetros para 80 km

Potencia (mW)	Dispersión acumulada (ps/nm)	BER
4mW	1313	8.1951e-012

Para descartar las pérdidas de potencia por atenuación del sistema se usa un amplificador óptico dopado con erbio con una ganancia de 16.8 dB según la ecuación 12.

Analizando los resultados de la tabla 2 la dispersión acumulada aumento, según esto el error lineal es mayor a medida que aumenta la distancia. A pesar de la incidencia del error, la tasa de error de bits no es lo suficientemente alta como que el receptor no pueda recibir la señal [8].

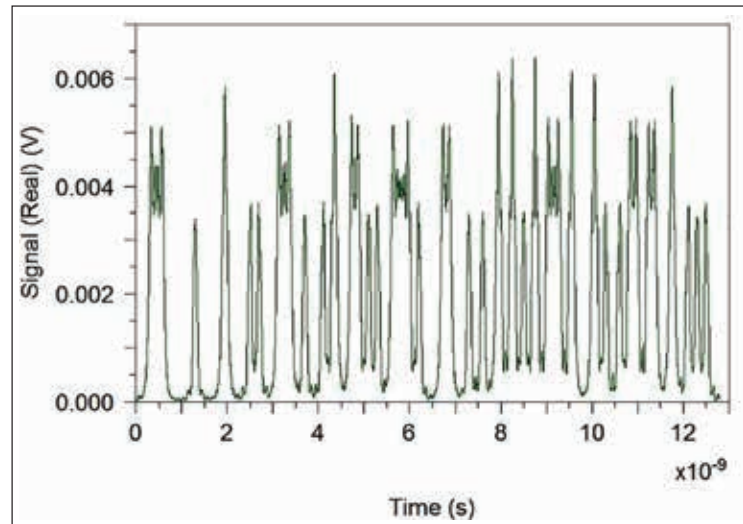


Figura 14. Señal de salida a 80 km.

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 14 se presenta la señal de salida de la comunicación óptica a 40 km, en la cual se puede observar claramente la distorsión generada por la dispersión cromática en los picos de la señal y la interferencia entre símbolos que se puede apreciar en el intervalo de tiempo de 4×10^{-9} y 12×10^{-9} .

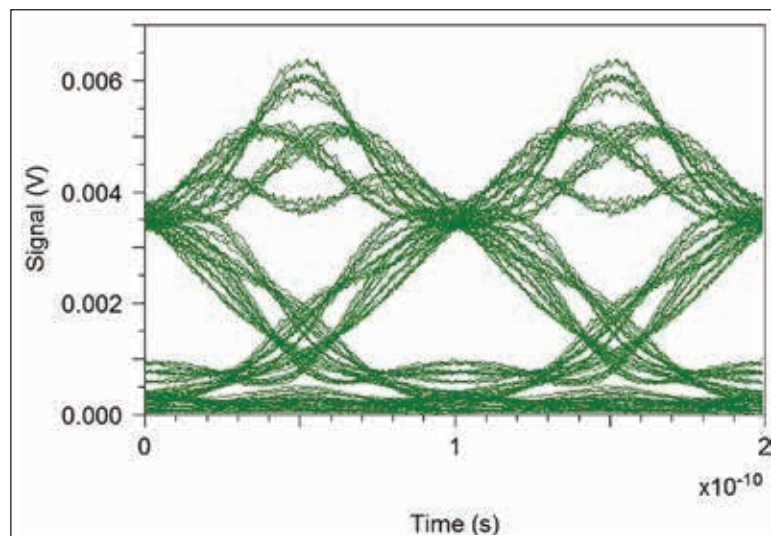


Figura 15. Diagrama de ojo en la salida del sistema a 80 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 15 se presenta el diagrama de ojo de la señal transmitida a una distancia de 80 km, se evidencia la degradación de la señal generada por la dispersión cromática, el diagrama de ojo se ve afectado tanto por la interferencia entre símbolos y las deformaciones en amplitud de la señal.

- **Compensación mediante ecualizador FFE**

A continuación, se realizan las simulaciones para compensar el error que produce la dispersión cromática utilizando un FFE, recibiendo una señal eléctrica, como se muestra en la figura 14, que pasara por el ecualizador con 9 taps para posteriormente salir como una señal eléctrica ecualizada como se puede apreciar en la figura 16.

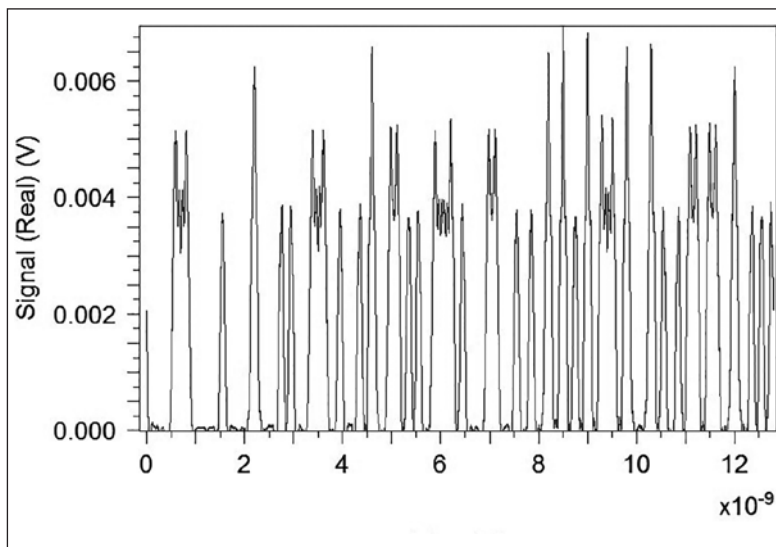


Figura 16. Señal compensada por el FFE a 80 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 16 se presenta la señal de salida de la comunicación óptica a 80 km y pasando por un ecualizador FFE, en la cual se puede observar que a 80 km se puede corregir con éxito la interferencia entre símbolos pero la distorsión generada por la dispersión cromática en los picos de la señal no se obtuvo una compensación apropiada, la medida de la tasa de error de bits que se presenta al utilizar el FFE es de 2.1948×10^{-70} la cual está por debajo del límite mínimo requerido para considerar la calidad de la información sea buena [8].

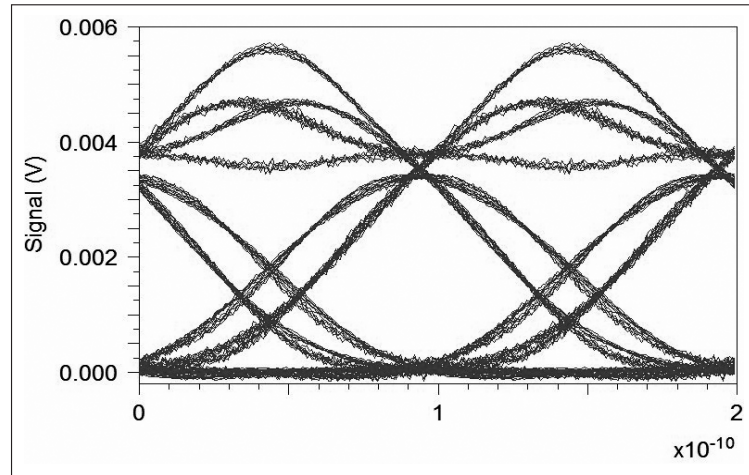


Figura 17. Diagrama de ojo después de aplicar el FFE a 80 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 17 se presenta el diagrama de ojo de la señal transmisora a una distancia de 80 km y pasando por el FFE, se evidencia que a pesar de corregir la interferencia entre símbolos la señal sigue estando bastante afectada por las distorsiones en amplitud que no se compensaron sufridas por la dispersión cromática.

- **Compensación mediante el conjugado de fase óptica**

Para cumplir con la ecuación 10 se utilizan dos fibras de idénticas características donde la primera fibra tiene una longitud $L_1 - 40\text{km}$ y la segunda fibra tiene una longitud $L_2 - 40\text{km}$, para cada uno de los casos se utilizan un amplificador dopado con erbio de ganancia 8.4 dB debido a que ya no es un tramo de fibra de 80 km si no dos tramos de fibra de 40 km.

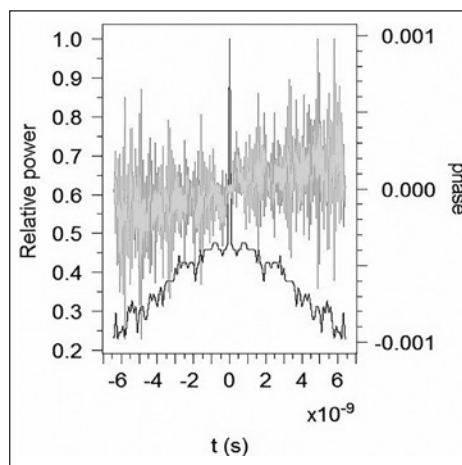


Figura 18. Fase óptica vs potencia a 40 km antes del OPC

Fuente: Elaborado por los autores

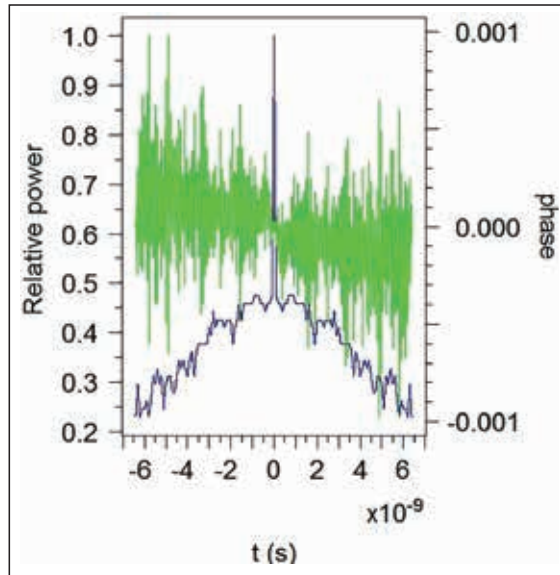


Figura 19. Fase óptica vs potencia a 40 km después del OPC

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 18 se presenta la fase óptica vs. potencia que lleva la señal de transmisión antes de entrar al conjugador de fase y en la figura 19 se muestra la fase conjugada de la señal de transmisión, se evidencia que al pasar por el conjugador solo afecta la fase de la señal, sin agregarle alguna otra distorsión al sistema.

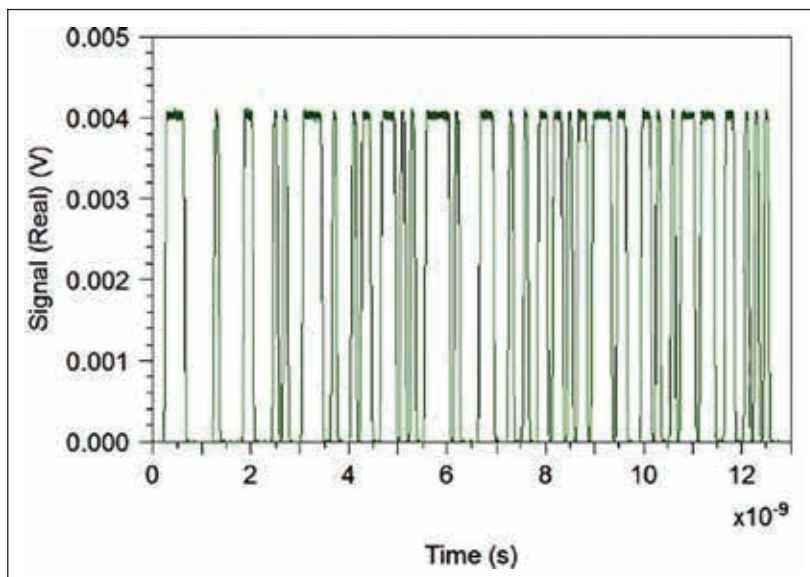


Figura 20. Señal compensada por el OPC a 80 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 20 se presenta la señal de salida de la comunicación óptica a 80 km utilizando un OPC para compensar los errores generados por la dispersión cromática, en la cual se puede observar que se ha podido corregir con éxito las distorsiones producidas por la dispersión cromática en su totalidad a 80 km, la medida de la tasa de error de bits que se presenta al utilizar el OPC es de 0 lo cual indica que de todos los bits enviados no hay probabilidad que ninguno salga erróneo.

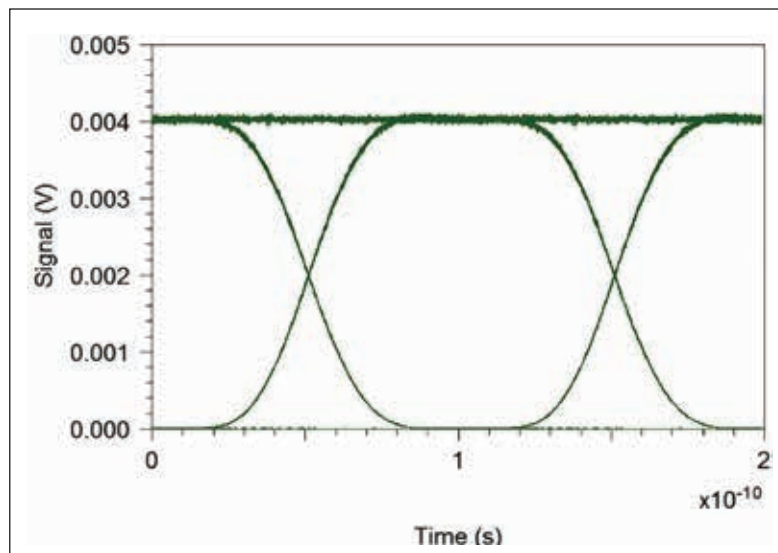


Figura 21. Diagrama de ojo después de aplicar el OPC a 80 km

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 21 se presenta el diagrama de ojo de la señal transmisora a una distancia de 80 km y pasando por el OPC, se evidencia un diagrama de ojo sin ninguna distorsión.

4. CONCLUSIONES

Al analizar los resultados de las simulaciones realizadas, se llega a la conclusión que la incidencia de la dispersión cromática es directamente proporcional a la longitud del canal de transmisión, por cada kilómetro de comunicación por fibra óptica la dispersión acumulada se incrementa 16.4125 ps/nm.

La eficiencia del conjugador óptico es del 100% al momento de recuperar la señal de entrada, siempre y cuando la ecuación 15 se cumpla con los parámetros de fibras idénticas y longitudes iguales, logrando en los tres casos una tasa de error de bit BER de 0%, lo cual indica que en la transmisión ningún bit saldrá erróneo.

La eficiencia del ecualizador de alimentación hacia adelante FFE disminuye conforme aumenta la longitud de la fibra óptica, esto se evidencia con la tasa de error de bit de $2.9217e-190$ a 40 km, comparado

con la tasa de error de bit de $2.1948e-70$ a 80 km, lo cual indica que a medida que aumenta la longitud de fibra óptica el ecualizador FFE va perdiendo eficiencia al momento de corregir la interferencia entre símbolos generada por la dispersión cromática.

Comparando las eficiencias y calidad de información que entregan los dos tipos diferentes de ecualizadores se llega a la conclusión que el conjugador de fase óptica es el más indicado para corregir el error lineal de la dispersión cromática, a pesar que el ecualizador FFE corrige la interferencia entre símbolos en las tres distancias evaluadas 40 km y 80 km, no corrige la distorsión en amplitud que genera la dispersión cromática; a diferencia del FFE, el conjugador de fase es capaz de corregir la interferencia entre símbolos y la distorsión en amplitud en las tres distancias evaluadas.

REFERENCIAS

- [1] J. P. Fernández, "Una red todo óptica para los servicios del futuro". Inst. Tecn. Inform., Rep. Telos comunicación e innovación, 2015.
- [2] J. F. P. Basto, "Evolution of FTTH Networks for NG-PON2," PT Inovação e Sist., 2014.
- [3] V. E. Bostjan Batagelj, M. A. Jurij Tratnik, Luka Naglic, Vitalii Bagan, Yury Ignatov, "Optical Access Network Migration from GPON to XG-PON" en *ACCESS 2012 : The Third International Conf. on Access Networks*, 2012, pp. 62-67.
- [4] S. Mas Gomez, J. Caraquitená Sale y P. Sanchis Kilders, "Control de la dispersión cromática en guías ranuradas nanofotónicas", Tesis Maest., Esc. Téc. Sup. Ing. de Telecomunicación, Univ. Pol. Valencia, Valencia, 2009.
- [5] F. R. Pascual, "Estudio de efectos no lineales en dispositivos fotónicos y su aplicación en sistemas de radio sobre fibra óptica", Tesis Ph.D., Dep. Com., Univ. Pol. Valencia, Valencia, Valencia, 2000.
- [6] Daniel F. Melo. F, Jairo A. Ruiz T., Alejandro T. Tovar, "Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en Redes WDM", *Rev. Entre Ciencia e Ingeniería*, Año 6, No. 11, pp.101-130, jun. 2012.
- [7] J. A. Guerrero, "Ecuación de canales ópticos de comunicación utilizando técnicas de procesamiento digital de señales sobre sistemas ópticos basados en el estándar GPON", Trab. Grado Ing. Elect., Dep. Elect. y Electr., Univ. Francisco de Paula Santander, Cúcuta, 2011.
- [8] F. Gómez López, "Efecto no lineal mezcla de cuarta onda (fwm) en transmisión por fibra óptica", Trab. Grado Ing. Elect., Dep. Elect. y Electr., Univ. Francisco de Paula Santander, Cúcuta, 2015.
- [9] A Montaz y M. Green, "An 80 mW 40 Gb/s 7-Tap T/2-Spaced Feed-Forward Equalizer in 65 nm CMOS", *Rev. IEEE journal of solid-state circuits*, Vol. 45, No. 3, 2010.
- [10] A. González García, "Análisis de Atenuación, Dispersión y Auto-modulación de Fase en Sistemas de Comunicaciones de Único Canal por Fibra Óptica a 10 Gb/s", Tesis Maest., Centro Inv. Ópt., A.C. León Guanajuato, México, 2007.