

# Compensación de dispersión cromática mediante la técnica de *pre-chirping* negativo utilizando moduladores Mach-Zehnder de tipo Single y Dual Drive

Eddy Valentín Báez Velasco<sup>a</sup>, Juan Sebastián Timarán Gómez<sup>a</sup>, José Giovanni López Perafán<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán, Cauca, Colombia

<sup>b</sup> PhD Ciencias de la Electrónica. Universidad del Cauca. Popayán, Cauca, Colombia

Recibido: 30/03/2017. Aprobado: 27/07/2017

## RESUMEN

En el presente artículo se estudia el uso de moduladores externos Mach-Zehnder de tipo Single Drive y Dual Drive como elemento compensador de dispersión cromática en una red óptica a 10 Gbps a nivel de simulación en la herramienta Optsim<sup>TM</sup> de RSoft, mediante la técnica de *pre-chirping* negativo. Para comprobar la validez del estudio se realizó el análisis del comportamiento de la tasa de error de bit, el diagrama del ojo y la duración de los pulsos ópticos de forma comparativa. Los resultados obtenidos evidenciaron las mejoras que presenta el sistema mediante el manejo del *chirp* de los moduladores.

**Palabras clave:** Dispersión cromática, modulador Mach-Zehnder, *pre-chirping* negativo, *chirp*, Optsim<sup>TM</sup>.

## Chromatic dispersion compensation using the negative pre-chirping technique through Single and Dual Drive Mach-Zehnder modulators

### ABSTRACT

In this paper, the use of Single and Dual Drive Mach-Zehnder external modulators as Chromatic Dispersion compensators in a 10 Gbps optical network at a simulation level in RSoft's Optsim<sup>TM</sup> tool, by negative pre-chirping technique is studied. To verify the validity of the study, a behavior analysis of the Bit Error Rate, the eye diagram and the duration of the optical pulses in a comparative way was carried out. The obtained results presented improvement in the system through the chirp management of the modulators.

**Key words:** Chromatic dispersion, Mach-Zehnder modulator, negative pre-chirping, chirp, Optsim<sup>TM</sup>.

**Key words:** Chromatic dispersion, Mach-Zehnder modulator, negative pre-chirping, chirp, Optsim<sup>TM</sup>.

## 1. Introducción

La constante evolución tecnológica ha traído consigo el incremento de la demanda de dispositivos electrónicos inteligentes y con ellos, nuevos y mejores servicios, lo que ha generado un aumento exponencial del tráfico que circula por los sistemas de comunicaciones, razón por la cual, los proveedores de servicio se han visto en la necesidad de adecuar la infraestructura de sus redes para que se adapten a los requerimientos de velocidad y ancho de banda de los usuarios. Una de las soluciones más interesantes y con mayores prestaciones es el uso de redes ópticas

que utilizan la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (WDM); sin embargo, existen factores que limitan la transmisión en dichos sistemas, como lo son los efectos lineales y no lineales. Uno de los fenómenos más importantes y que genera mayores inconvenientes cuando se trabaja con múltiples señales a altas velocidades (>10 Gbps) es la dispersión cromática, la cual limita de forma significativa la distancia y la tasa de transmisión de datos, debido al ensanchamiento de los pulsos que se produce durante la propagación de la señal por la fibra, lo que provoca la interferencia intersimbólica (ISI) y por consecuente, errores en la recepción de la información (Borne, 2008; Lidon, 2011).

Es por ello que se recurre a utilizar diversas técnicas de compensación de CD como las fibras compensadoras de dispersión (DCF), las rejillas de

\* Autor de correspondencia.

E-mail: eddybaez@unicauca.edu.co  [orcid.org/0000-0002-1680-9301](https://orcid.org/0000-0002-1680-9301)

Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=X8T2jY4AAAAJ&hl=es>

Cómo citar este artículo:

Báez Velasco E. V., Timarán Gómez J. S., López Perafán J. G. (2017). Compensación de dispersión cromática mediante la técnica de *pre-chirping* negativo utilizando moduladores Mach-Zehnder de tipo Single y Dual Drive. *Revista Vector*, 12: 5-14.



fibra Bragg (FBG) y los conjugadores de fase óptica (OPC); cada uno con sus correspondientes ventajas y desventajas (Spolitis y Ivanovs, 2011; Pal, 2013).

Recientemente se ha tenido especial interés en el estudio de los moduladores Mach-Zehnder (MZM) en aplicaciones diferentes a la de modular una señal óptica, con especial interés en la compensación de CD (Rogers *et al.*, 2010). Por ello, en el presente artículo se estudia la implementación de los MZM como compensadores de dispersión cromática utilizando la técnica de *pre-chirping* negativo.

$$\frac{\partial E}{\partial z} = - \underbrace{\frac{\alpha}{2} E}_{\text{Atenuación}} - j \underbrace{\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial T^2}}_{\text{Dispersión}} + \underbrace{\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial T^3}}_{\text{Pendiente de dispersión}} + \underbrace{j \gamma |E|^2 E}_{\text{No linealidades de Kerr}} \quad (1)$$

El término  $\beta_2$ , correspondiente al segundo orden de dispersión, es el parámetro conocido como dispersión de la velocidad de grupo (GVD) asociado a la dispersión cromática y representa la dependencia de la velocidad de grupo con la frecuencia (o longitud de onda), lo que causa que las diferentes componentes espectrales que conforman un pulso, viajen a diferentes velocidades y lleguen al extremo receptor en diferentes tiempos, provocando el ensanchamiento temporal del pulso óptico inicial (Agrawal, 2007; Lidon, 2011; Del Río y Horche, 2013). La dispersión cromática aumenta con la distancia de transmisión y existe un límite máximo hasta que el sistema funciona correctamente, por lo cual se hace necesario utilizar mecanismos de compensación de CD, como el expuesto en el presente artículo.

## 2.2 Moduladores Mach-Zehnder

Los moduladores Mach-Zehnder son un tipo de moduladores externos constituidos por dos electrodos metálicos coplanares situados a lo largo de una guía de onda fabricada con un cristal electro-óptico, generalmente niobato de litio. Al aplicar un campo eléctrico sobre los electrodos, se presenta un efecto electro-óptico que permite realizar una modulación de señal óptica de acuerdo con los cambios que presenta dicho campo (Chen y Murphy, 2011; Cvijetic y Djordjevic, 2013; Srivastav y Kumar, 2016).

Un parámetro fundamental en los MZM es el factor de *chirp* que se define como una modulación de fase residual dada por la relación entre los cambios instantáneos de fase ( $\phi$ ) asociados a los cambios temporales de intensidad ( $S$ ) en una modulación de intensidad, tal como se muestra en la Ecuación 2. El factor de *chirp* puede ser nulo, positivo o negativo; a partir de este último se denominan las técnicas de

## 2. Fundamento teórico

### 2.1 Dispersión cromática

La dispersión cromática ocurre principalmente en las fibras monomodo (SMF), que es una guía de onda cilíndrica la cual puede ser modelada como un medio no lineal. La propagación de una onda en el eje  $z$  a través de la misma, puede ser descrita por la ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE) [Ecuación (1)] que expone los efectos que afectan la transmisión (Agrawal, 2007; Borne, 2008).

*pre-chirping* positivo y negativo correspondientemente (Chen y Murphy, 2011; Mohammed *et al.*, 2014; Srivastav y Kumar, 2016).

$$\alpha_{chirp} = \frac{1}{2S} \frac{\left(\frac{d\phi}{dt}\right)}{\left(\frac{dS}{dt}\right)} \quad (2)$$

El factor de *chirp* debe ser un elemento de consideración en el diseño de un enlace ya que sin un correcto manejo puede ser un efecto indeseable que interactúa con la dispersión cromática y los efectos no lineales de la fibra, potenciando su efecto. Sin embargo, el *chirp* puede ser utilizado para favorecer la transmisión mediante la técnica de pre-compensación conocida como *pre-chirping* negativo mostrada a continuación en la Figura 1 (Cvijetic y Djordjevic, 2013; Del Río y Horche, 2013; Macho Ortiz, 2013).

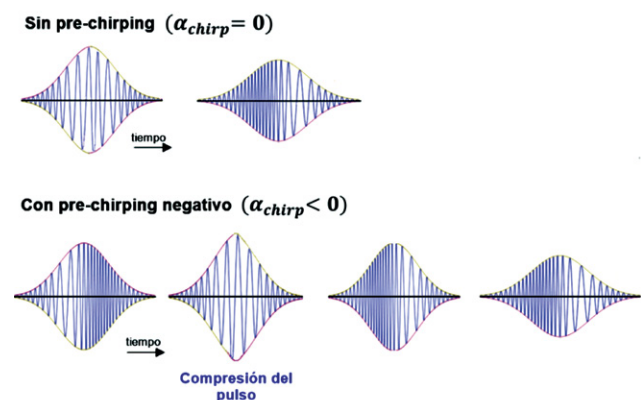


Figura 1. Técnica de *pre-chirping* negativo.

Al aplicar la técnica de *pre-chirping* negativo, la señal se pre-distorsiona antes de ser transmitida, con el fin de producir un efecto contrario al que sufrirá al propagarse por la fibra. Lo anterior se manifiesta en la compresión temporal del pulso que ayuda a compensar los efectos de la GVD causados por la dispersión de la fibra, mejorando la forma de los pulsos ópticos en recepción (Chen y Murphy, 2011; Cvijetic y Djordjevic, 2013; Macho Ortiz, 2013).

### 2.2.1 MZM Single Drive

Un modulador Mach-Zehnder Single Drive (SD-MZM) se caracteriza porque la señal óptica que incide sobre su entrada se divide y es afectada por igual en cada brazo, debido a que se aplica la misma tensión, pero de signo contrario ( $V_1 = -V_2$ ). Existen dos tipos de SD-MZM dependiendo de su estructura de fabricación, denominados X-Cut y Z-Cut según sea la orientación de los ejes del cristal (niobato de litio) en las guías de onda y de su simetría respecto a los electrodos (Rogers *et al.*, 2010; Chen y Murphy, 2011; Macho Ortiz, 2013).

En un SD-MZM con estructura X-Cut, las guías de onda están localizadas entre los electrodos, los cuales se encuentran distribuidos simétricamente respecto a estas, lo que permite obtener idealmente una modulación de intensidad libre de *chirp*. Típicamente, los valores de *chirp* para este tipo de moduladores son de  $\pm 0,1 \pm 0,1$  puesto que lograr una estructura perfectamente balanceada puede ser un proceso complejo en la fabricación. Por otro lado, en un SD-MZM con estructura Z-Cut, las guías de onda están localizadas justo debajo de dos de los electrodos (uno de tierra y uno caliente), esta distribución causa una asimetría, y por tanto, se genera una modulación de fase residual o *chirp* que acompaña a la modulación de intensidad. Los valores típicos de un modulador Z-Cut son de aproximadamente  $\pm 0,6 \pm 0,1$  (Rogers *et al.*, 2010; Macho Ortiz, 2013; Srivastav y Kumar, 2016).

Cabe resaltar que el *chirp* de un modulador SD-MZM es un parámetro fijo dado el fabricante y que puede variar entre los mismos.

### 2.2.2 MZM Dual Drive

Un modulador Mach-Zehnder Dual Drive (DD-MZM) se caracteriza porque permite aplicar un voltaje distinto a la señal óptica que se propaga por cada uno de los brazos. En un DD-MZM el valor del factor de *chirp* es flexible debido a que puede ser controlado mediante los voltajes  $V_1(t)$  y  $V_2(t)$ , que son aplicados de forma independiente a cada electrodo. Si se asume que los brazos del modulador son simétricos, el valor del factor *chirp* aproximado puede expresarse como se muestra en la Ecuación 3 (Chen y Murphy, 2011; Mohammed *et al.*, 2014).

$$\alpha_{chirp} = \frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1} \quad (3)$$

A pesar de que el valor de *chirp* en un DD-MZM puede tomar diversidad de valores, el rango típico es de -1,5 a 1,5 (Cvijetic y Djordjevic, 2013).

## 2.3 Metodología y herramientas

Para la simulación de la red óptica se utiliza la herramienta Optisim™ de RSoft, en complemento con el software MATLAB para la elaboración de gráficas de resultados.

A continuación, se presenta el modelo de implementación para los dos casos de estudios propuestos, donde ambas redes utilizan el formato de modulación NRZ-OOK, con la diferencia de que el primer caso de estudio hace uso de un SD-MZM y el segundo utiliza un DD-MZM, tal como se aprecia en las figuras 2 y 3 respectivamente.

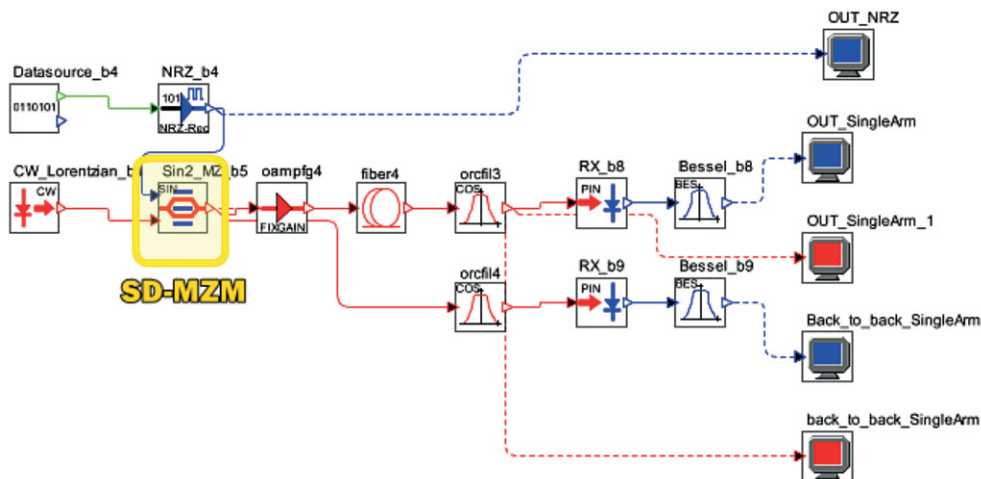


Figura 2. Caso de estudio 1: Sistema con SD-MZM.

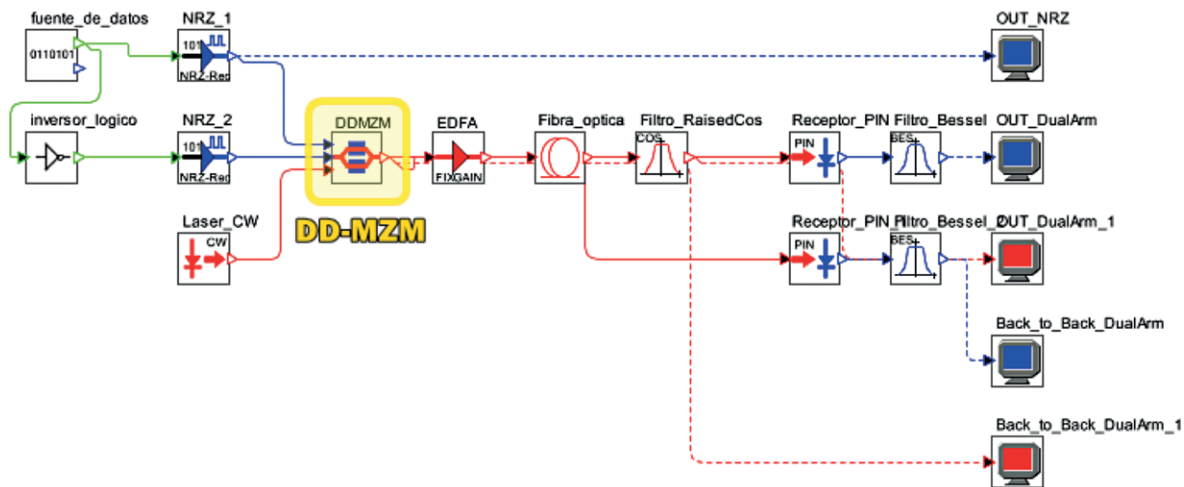


Figura 3. Caso de estudio 2: Sistema con DD-MZM.

En las figuras 2 y 3 se resaltan en un recuadro amarillo los MZM utilizados en cada caso y es justo a través de estos elementos, que se busca compensar la CD mediante la técnica de *pre-chirping* negativo. La forma de proceder consiste en elegir los parámetros que permanecerán fijos tanto en el sistema en general, así como en los MZM implementados, dejando como único parámetro variable de simulación el *chirp* de dichos moduladores, el cual variará en el rango especificado para cada tipo de MZM, según lo mencionado en los fundamentos teóricos. Lo que se busca es estudiar el efecto que tiene la variación del valor de *chirp* de los MZM, con el objetivo de determinar si únicamente mediante este parámetro es posible compensar la CD; para ello se recurre al análisis del comportamiento de la BER, el diagrama del ojo con sus correspondientes parámetros y el ensanchamiento de los pulsos de forma comparativa. Una gran ventaja que tiene la herramienta Optisim™ es que tiene un modo de simulación en el dominio temporal denominado “VBS linear fiber” el cual realiza la simulación, considerando únicamente los efectos lineales del sistema como la dispersión y la atenuación; de esta forma se puede realizar el análisis del fenómeno de interés (dispersión cromática) en el sistema, sin considerar efectos adicionales como los no lineales, que pueden incidir en los resultados y que no son el caso de estudio del presente artículo.

En este punto es importante aclarar que por simplificación del proceso de simulación y análisis, el sistema a simular cuenta con un único canal y no con múltiples canales como típicamente se implementan

las redes WDM. Sin embargo, el proceso de simulación es válido debido a que a diferencia de los mecanismos tradicionales de compensación como DCF o FBG que actúan sobre el medio de transmisión y por tanto sobre la totalidad de canales, la técnica de *pre-chirping* negativo se implementa a través del MZM que forma parte del transmisor de cada canal individual. De esta forma, los resultados que se obtengan del estudio para este único canal pueden ser aplicados y replicados a múltiples canales en una red WDM, para obtener una mejora general del enlace.

Algunos de los parámetros fijos de interés para ambos casos de estudio son: formato de modulación NRZ-OOK, velocidad de transmisión a 10 Gbps, dispersión de la fibra de 18 ps/nm\*km, atenuación de 0,18 db/km y una longitud del enlace de 80 km.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Sistema con SD-MZM

En este primer caso de estudio se varía el *chirp* del SD-MZM dentro del rango de valores típicos para este tipo de moduladores. Los valores más comunes entre los fabricantes oscilan entre  $\pm 0,1 \pm 0,1$  para moduladores X-Cut y  $\pm 0,6 \pm 0,1$  para moduladores Z-Cut. Con base en lo anterior, se procede a realizar la simulación con cada uno de estos valores de *chirp* y se consigna la BER obtenida en recepción asociada a cada valor de *chirp*. A continuación, la Figura 4 muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos del proceso descrito.



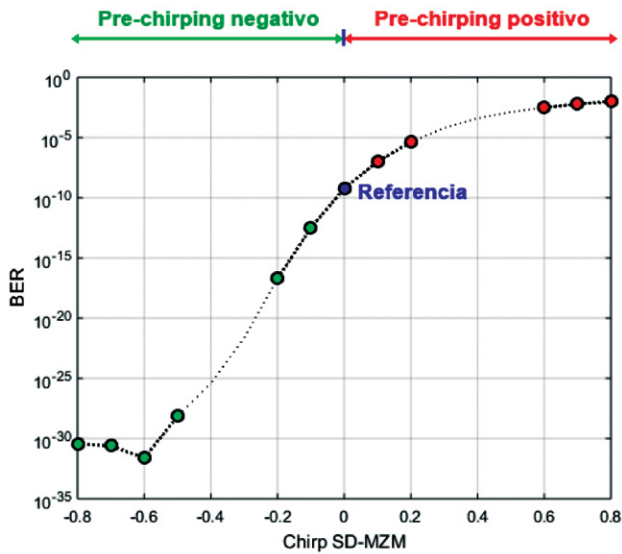


Figura 4. Gráfica de BER vs. Chirp para un SD-MZM.

Como se aprecia en la Figura 4, se establece un punto referencia que equivale a un valor de chirp igual a cero, el cual está asociado a una BER de  $5,87E-10$ , que es el valor obtenido en recepción cuando el sistema no utiliza ninguna técnica de *pre-chirping* para la compensación de CD. Posteriormente, el sistema se simula para valores de *chirp* positivos y negativos típicos para un SD-MZM, con el objetivo de analizar su incidencia en el comportamiento del sistema.

En la Figura 4 se puede observar que para valores positivos de *chirp* se presenta un incremento progresivo en la BER hasta llegar a un valor de  $9,73E-03$ , debido a que el *chirp* positivo interactúa con los efectos lineales de la fibra óptica y potencia su efecto; sin embargo, lo contrario ocurre para valores negativos de *chirp*, para los cuales se aprecia que la BER va disminuyendo continuamente hasta alcanzar un valor mínimo de  $2,47E-32$  para un *chirp* de  $-0,6$ , siendo este el valor de *chirp* en el cual el sistema presenta la mejor BER. Con lo descrito, se puede concluir que utilizar la técnica de *pre-chirping* positivo es algo indeseable para este sistema y por tanto no se profundizará en su análisis. Por otro lado, se pudo observar que al utilizar la técnica de *pre-chirping* negativo con un SD-MZM, es posible conseguir una mejor BER, evidenciando el efecto positivo de dicha técnica sobre el sistema debido a la compensación de CD lograda.

Además de la mejora evidenciada en la BER, es importante analizar la forma del diagrama de ojo y los pulsos obtenidos en recepción para constatar que efectivamente se ha logrado compensar el efecto de la CD. El literal (a) de la Figura 5 corresponde al sistema con un valor de *chirp*=0 (sistema de referencia) y el literal (b) está asociado al caso en que se obtuvo la mejor BER del sistema anteriormente, con un valor de *chirp*= $-0,6$  en el SD-MZM, con el cual se logró la mayor compensación de CD.

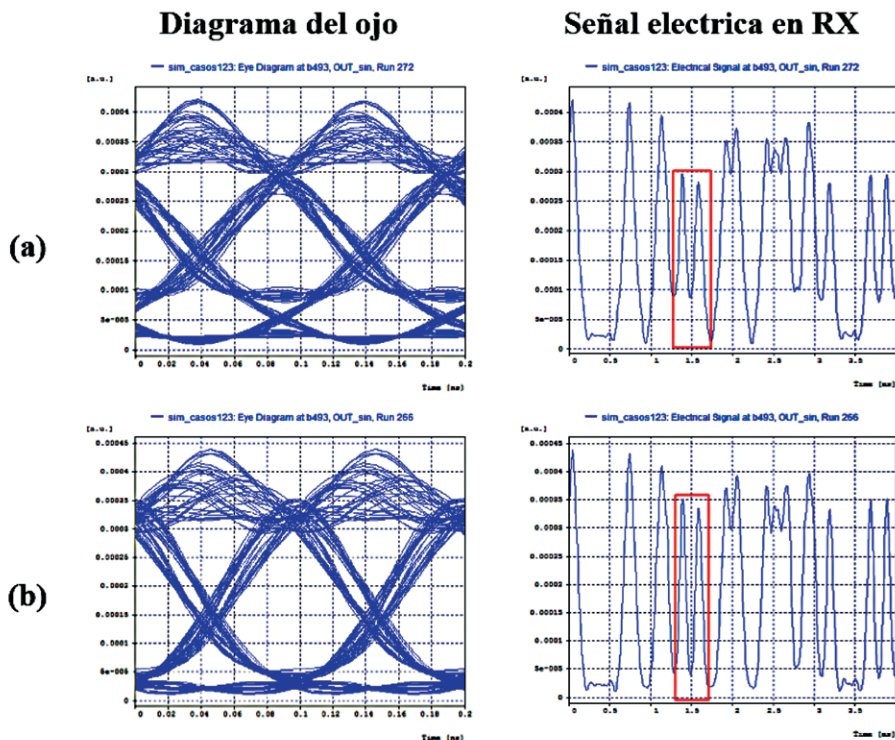


Figura 5. Diagrama del ojo y señal en recepción para (a) *chirp*=0. (b) *chirp*= $-0,6$  para el SD-MZM.

En el diagrama del ojo existen algunos factores especiales que pueden atribuirse al fenómeno de la CD, uno de ellos es el *jitter*, el cual puede ser estimado mediante la anchura del punto de cruce de amplitud. En el literal (b) de la Figura 5 en el cual se obtuvo la mejor BER, se aprecia una mayor convergencia de los trazos hacia una región más compacta en el punto de cruce del diagrama y por tanto, un *jitter* menor que en el sistema de referencia del literal (a); además del *jitter*, la apertura del patrón de ojo es otro factor muy importante a tener en cuenta, dado que representa la tolerancia del sistema frente al ruido y errores de sincronización, en el caso del literal (a) dicha amplitud es muy pequeña en el instante óptimo de muestreo y adicionalmente se observan formaciones de trazos adicionales en la parte inferior del diagrama, lo cual genera errores en la recepción de la información. Sin embargo, el diagrama de ojo del literal (b) evidencia la mejora en este aspecto, debido a compensación de

la CD lograda con la técnica aplicada, logrando una mayor apertura y una mejor forma en general del diagrama. Seguidamente, se procede a analizar las señales eléctricas en recepción mostradas en la Figura 5, haciendo énfasis en los tramos de señal encerrados por un recuadro rojo, en el cual se aprecia que los pulsos relacionados el literal (a) presenta un mayor solapamiento en la señal, es decir, un mayor nivel de ISI, causada por la disminución de amplitud y el ensanchamiento temporal de los pulsos provocado por la CD, conllevando a posibles errores dependiendo del umbral de decisión del receptor; ahora bien, en (b) se observa que dicho solapamiento se ve disminuido en gran nivel y los pulsos tienen una forma más adecuada, en este caso el nivel de ISI reflejado no es tan alto con respecto al literal (a), facilitando la correcta interpretación de la información y lo cual justifica el bajo valor de BER obtenido en este caso.

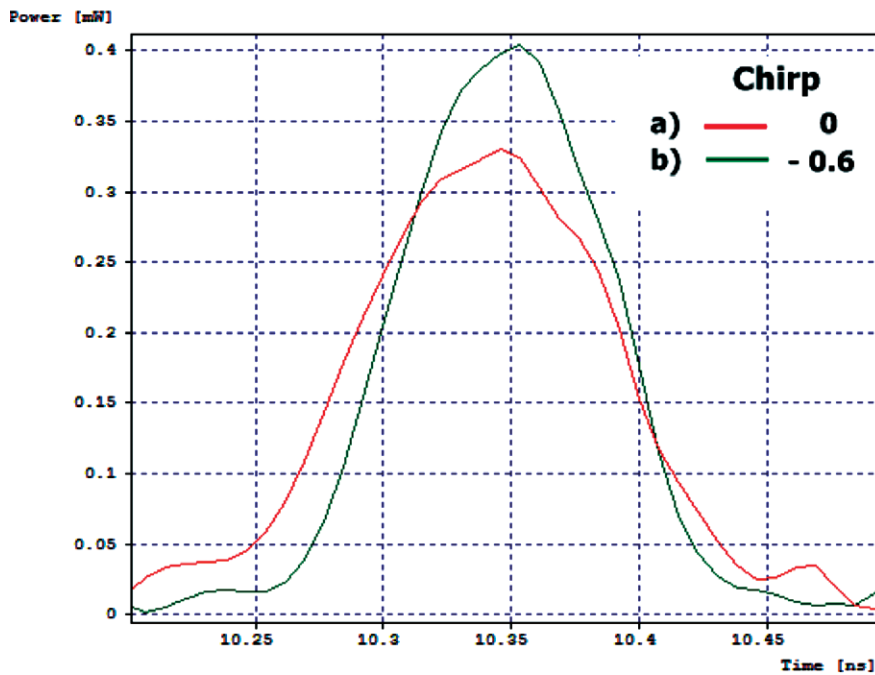


Figura 6. Comparación de la duración de los pulsos ópticos para diferentes valores de *chirp* del SD-MZM.

Finalmente, se analiza de forma más detallada el ensanchamiento sufrido por el pulso óptico en recepción como consecuencia directa de la CD. En la Figura 6 se muestra de manera comparativa la duración de los pulsos ópticos correspondientes a los valores de *chirp* de los literales (a) y (b) de la Figura 5. Dicho esto, el pulso de color rojo corresponde al sistema de referencia con ausencia de *chirp* en el modulador y el pulso verde está asociado al sistema cuando se establece un valor de *chirp* de -0,6 en el modulador.

En la Figura 6 se evidencia cómo el pulso de color verde (*chirp*=-0,6) presenta un menor ensanchamiento que el pulso rojo (*chirp*=0), lo que demuestra nuevamente que el uso de la técnica de *pre-chirping* negativo contrarresta el ensanchamiento temporal de los pulsos producidos por la CD, haciendo que tengan una duración cercana a la ideal (0,1 ns), un evento deseable en los enlaces ópticos debido a que disminuye el nivel de ISI y por ende mejora BER del sistema.

### 3.2 Sistema con DD-MZM

En este segundo caso de estudio se simula el mismo sistema del primer caso, pero esta vez se utiliza un DD-MZM, recordando que este tipo de moduladores tiene un rango de valores de *chirp* más amplio que puede oscilar entre -1,5 y 1,5 típicamente y el cual puede ser

controlado con mayor facilidad a través de los voltajes aplicados cada brazo del modulador. A continuación, en la Figura 7 se muestra la representación gráfica de los valores de BER obtenidos para cada valor de *chirp* del DD-MZM dentro del rango mencionado.

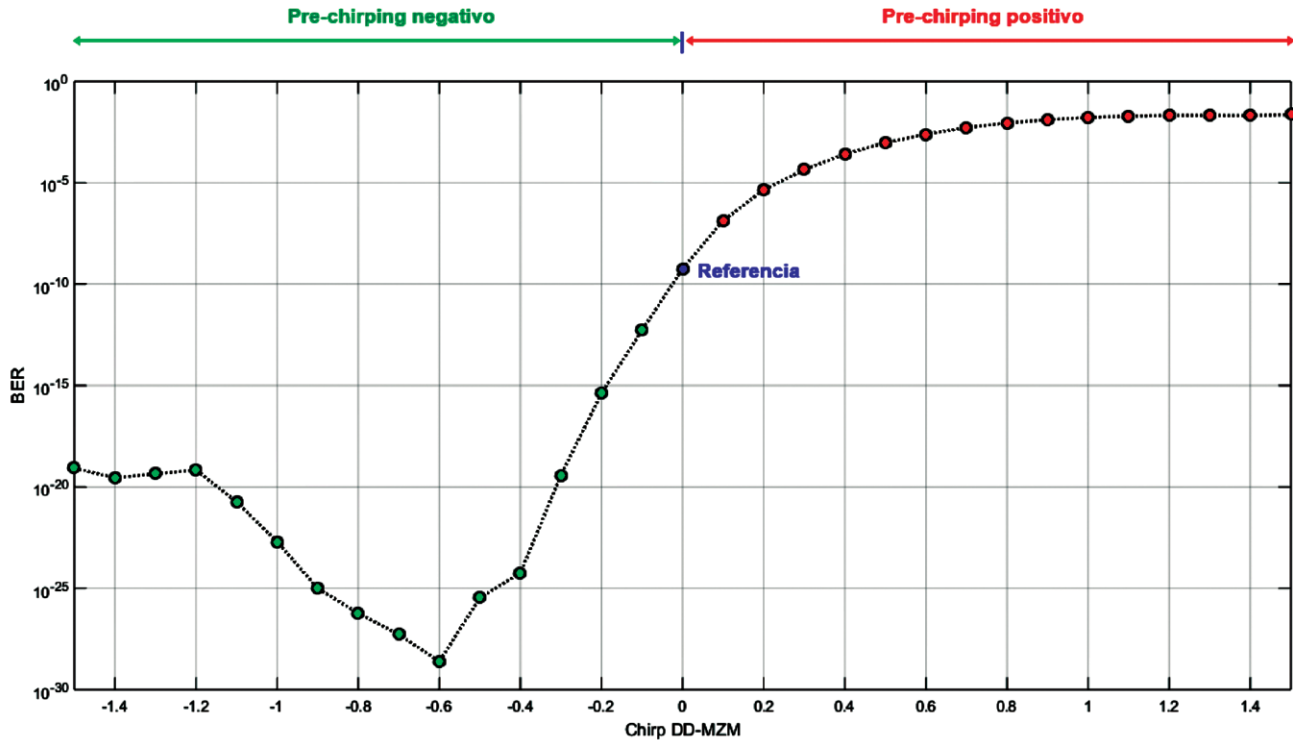


Figura 7. Gráfica de BER vs. *Chirp* para un DD-MZM.

Para interpretar correctamente la Figura 7 se debe partir del sistema de referencia que es aquel en donde el *chirp* tiene un valor de 0, es decir, el sistema que no utiliza el mecanismo de compensación estudiado. En este caso, la BER que se obtiene en recepción es de 5,85E-10, la cual sirve como punto de partida para analizar el comportamiento del sistema al aplicar las técnicas de *pre-chirping* positivo y negativo. De forma similar al primer caso de estudio, se puede observar que a medida que el *chirp* toma valores positivos mayores, la BER comienza a desmejorar de manera progresiva, llegando incluso a una BER de 2,29E-02, en donde el *chirp* tiene un valor de 1,5, evidenciando nuevamente los efectos negativos de aplicar el *pre-chirping* positivo en este sistema. Lo contrario ocurre con valores negativos de *chirp*, en donde la BER del sistema mejora considerablemente

llegando incluso a un valor de 2,47E-29 en donde el *chirp* tiene un valor de -0,6, siendo este el mejor caso. Por tanto, se concluye que únicamente con la variación del *chirp* del DD-MZM también se puede obtener una mejora significativa de la BER del sistema mediante la técnica de *pre-chirping* negativo, con la ventaja de tener un amplio rango de valores de *chirp* que puede ser controlado mediante la manipulación de los voltajes aplicados a los electrodos y no depender de un valor dado por el fabricante como en el caso de los SD-MZM.

Realizando un análisis similar al caso de estudio anterior, en la Figura 8 se ilustra el diagrama de ojo y un tramo de los pulsos en recepción para el sistema de referencia con *chirp*=0 mostrado en el literal (a) y un sistema mejorado que utiliza un *chirp* de -0,6 representado en (b).

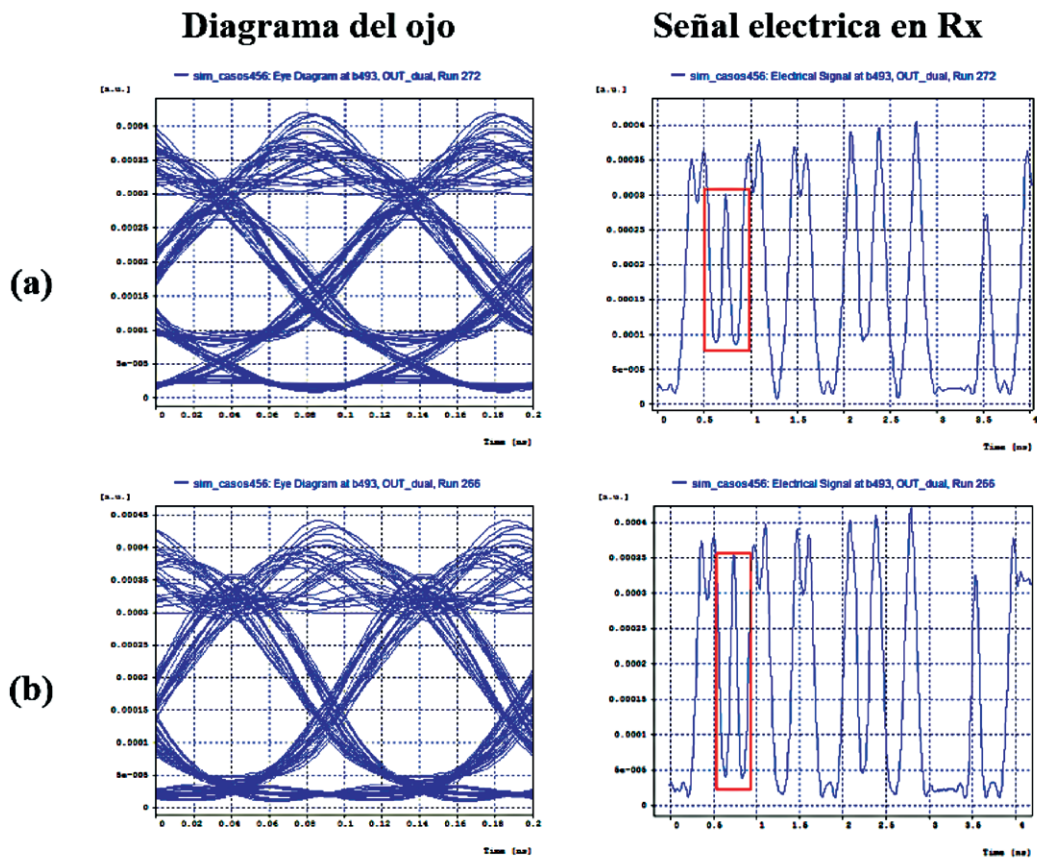


Figura 8. Diagrama del ojo y señal en recepción para (a)  $\text{chirp} = 0$ . (b)  $-0,6$  para el DD-MZM.

De forma semejante al caso de simulación anterior, se estudian algunos parámetros de los diagramas de ojo mostrados en la Figura 8, comenzando el análisis del *jitter*. Es posible apreciar que en el sistema de referencia mostrado en (a), el diagrama de ojo presenta un mayor *jitter* que en (b), en donde en este último, los trazos en el cruce de amplitud convergen a una región de anchura más pequeña, que indica un sistema con menor CD. En segunda instancia, se debe tener en cuenta la apertura que presenta el ojo en cada literal, inicialmente se observa que en (a) la apertura del ojo es más pequeña respecto a (b) y adicionalmente se presentan formaciones de trazos adicionales, lo que sugiere la alta presencia de CD; así mismo, el ojo presenta poca apertura vertical y horizontal que indica la baja tolerancia del sistema al ruido y errores de sincronización respectivamente; por su lado, el diagrama en (b) presenta una apertura de ojo mayor

que permite que haya una mejor interpretación de los datos en recepción y por tanto un mejor desempeño en la BER del sistema. Para darle soporte al análisis efectuado al diagrama de ojo, es necesario observar las señales eléctricas de la Figura 8; en principio, se puede afirmar que la señal referida al literal (a) contiene un alto nivel de ISI, ya que como se ve en el recuadro rojo, los pulsos tienen tendencia a solaparse debido al ensanchamiento de los pulsos y disminución en el nivel de la señal, lo que puede conllevar a errores de interpretación en el receptor al no saber si en dicho instante está llegando un 1 ó un 0; sin embargo, en el literal (b), hay una manifiesta diferencia entre el nivel de los bits, dejando entre visto el bajo nivel de ISI, lo cual permite que el receptor pueda interpretar de una manera más apropiada la información gracias a la compensación de CD lograda con el valor de *chirp* en ese caso.



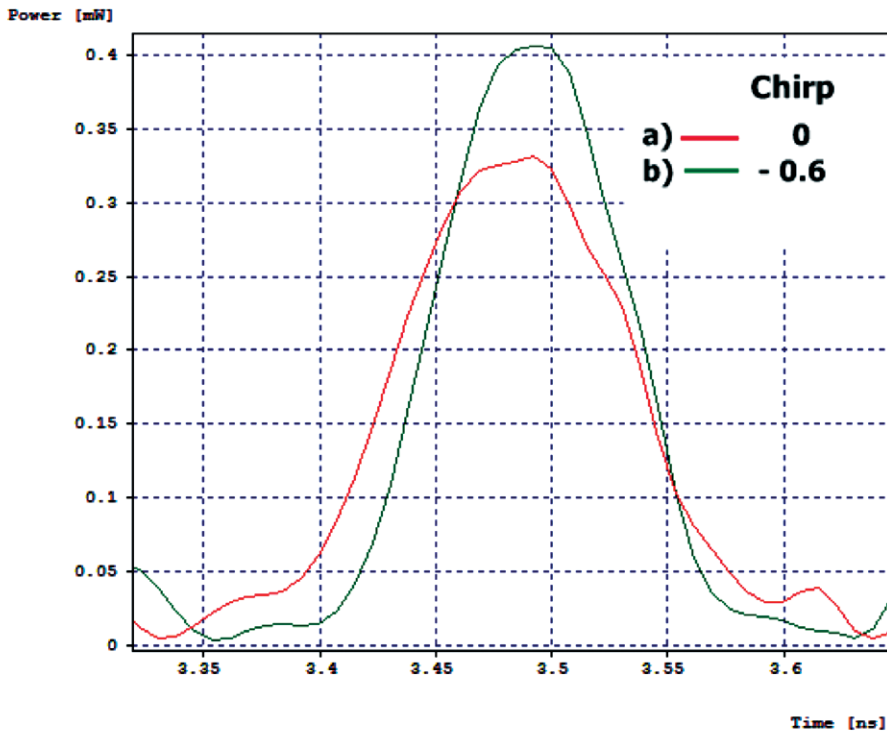


Figura 9. Comparación de la duración de los pulsos ópticos para a)  $chirp=0$  y b)  $chirp=-0,6$  para un DD-MZM.

Finalmente, en la Figura 9 se muestra con mayor detalle el ensanchamiento de los pulsos ópticos de acuerdo al valor del *chirp* presente en el DD-MZM en cada literal. El pulso de color rojo está asociado al sistema que no utiliza ninguna compensación ( $chirp=0$ ); por otra parte, en color verde se ilustra un pulso óptico del sistema que utiliza la técnica de *pre-chirping* negativo con  $chirp=-0,6$ . Efectuando un análisis comparativo entre estos, se concluye que el uso de un *chirp* negativo ayuda a compensar los efectos de la CD, debido a que el pulso de color verde experimenta un menor ensanchamiento (tiene una duración menor) respecto al pulso de color rojo, acercándose a la duración ideal del pulso de 0,1 ns correspondiente a una velocidad de 10 Gbps.

#### 4. Conclusiones

En el artículo se demostró que es posible compensar los efectos producidos por la dispersión cromática en una red óptica a 10 Gbps, mediante el uso de la técnica de *pre-chirping* negativo usando moduladores Mach-Zehnder de tipo Single Drive y Dual Drive. Los resultados obtenidos muestran la evidente mejora del sistema al variar el *chirp* de ambos moduladores en el intervalo de valores propuestos, obteniendo en cada caso una mejor BER, la cual está a su vez asociada a diagramas de ojos y pulsos con una forma

más apropiada para una correcta interpretación en recepción. De igual manera, al realizar la comparación de los pulsos ópticos se evidenció que el sistema con *chirp* negativo presentaba pulsos de menor duración que el sistema de referencia en ausencia de *chirp* y, por tanto, se mitigó considerablemente el ensanchamiento temporal del pulso provocado por la CD, y por consiguiente, se logró reducir el nivel de ISI en el sistema. Esto evidencia el uso de MZM como compensadores de CD sin la necesidad de utilizar elementos adicionales en el sistema, como los mecanismos tradicionales de compensación como las DCF o FBG. Esto supone una serie de beneficios que pueden ir desde un beneficio económico en la implementación de un enlace, lograr una mayor distancia de cobertura y hasta la prolongación del tiempo de vida útil de un enlace ya implementado, el cual puede ser fácilmente re-adequado para cumplir los requerimientos.

Hay que resaltar que los DD-MZM tienen un rango de valores de *chirp* más amplio y controlable, lo que resulta en un modulador más versátil para la compensación de CD frente a los SD-MZM, los cuales tienen un único valor de *chirp* determinado por el fabricante; sin embargo, estos últimos pueden ser útiles para la compensación de CD si de antemano se conoce el valor de *chirp* para el cual se logre la mayor compensación. En este estudio en particular,

se evidenció que utilizar un DD-MZM no representó una mayor ventaja frente a los SD-MZM, puesto que el valor de *chirp* con el que se logra la máxima compensación, es un valor típico de los fabricantes para estos últimos. Sin embargo, no siempre ocurre esto puesto que el valor de máxima compensación depende de la disposición y configuración de los elementos del transmisor relacionados estrechamente con el formato de modulación implementado. De esta manera, habrá casos en que el mayor beneficio de la técnica de *pre-chirping* negativo se obtenga para valores de *chirp* que solo los alcanza un DD-MZM.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio son aplicables a redes WDM con múltiples canales, en donde la compensación individual de cada canal que viaja por el medio, mejorará las condiciones del enlace una vez se implementen un mayor número de canales, disminuyendo el efecto de la CD y por ende reduciendo el nivel ISI en el sistema.

### Referencias

- Agrawal G.P. (2007). *Nonlinear fiber optics*. Academic press.
- van den Borne D. (2008). *Robust optical transmission systems: modulation and equalization*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. 295 p.
- Cvijetic M., Djordjevic I. (2013). *Advanced optical communication systems and networks*. Artech House.
- Chen E., Murphy A. (2011). *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*. 1 ed, ed. Press C. 568 p.
- Del Río C., Horche P. (2013). Fibras ópticas: Interacción dispersión-chirp en sistemas ópticos modulados directamente. *Óptica pura y aplicada*, 46(3): 231-247.
- Lidon M.S. (2011). *Digital Pre-compensation of Chromatic Dispersion in QPSK high speed telecom systems*.
- Macho Ortiz A. (2013). *Comunicaciones Ópticas de Banda Ancha con Fase Modulada: "Estudio de la Degradación de la Señal Óptica"*. Tecnología fotónica y bioingeniería, Universidad Politécnica de Madrid.
- Mohammed N.A., El-Guindy Y., Aly M.H. (2014). System Optimization to Eliminate Chirping in Dual Drive LiNbO<sub>3</sub> MZM at 40 Gb/s. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 1(2): 74-81.
- Pal A. (2013). *Performance analysis of WDM system with FBG and DCF as compensator*. Tesis de Maestría. Department of Electronics and Communication Engineering, Thapar University: Patiala. 85 p.
- Rogers C.E., Carini J.L., Pechkis J.A., Gould P.L. (2010). Characterization and compensation of the residual chirp in a Mach-Zehnder-type electro-optical intensity modulator. *Optics express*, 18(2): 1166-1176.
- Spolitits S., Ivanovs G. (2011). Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation. En: *Communication Technologies Workshop (Swe-CTW), 2011 IEEE Swedish*. IEEE. pp. 29-33.
- Srivastav A., Kumar S. (2016). A Novel Approach to Generate Chirped Waveform by using Chirped Lithium Niobate Mach-Zehnder Modulator. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 9(7): 315-328.