

Análisis mediante simulación de la Dispersión Cromática en las Fibras Ópticas ITU-T G.652 e ITU-T G.655 y su compensación

C. R. Paulo A., J. J. María S.

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional

Resumen- La dispersión cromática (CD, Chromatic Dispersion) es un factor crítico, que afecta la calidad de la señal óptica que se transmite en estos sistemas de comunicaciones y puede llegar a ser un limitante a grandes distancias y altas velocidades, generando errores en recepción. En este trabajo se analiza mediante simulación el fenómeno de dispersión cromática en las fibras ópticas monomodo ITU-T G.652 e ITU-T G.655, utilizando OptiSystem en escenarios en los cuales se varían la velocidad de transmisión, distancia, potencia de la señal óptica, a fin de analizar su incidencia en la CD y por ende en la degradación de los pulsos; así como luego, utilizando el mecanismo de compensación DCF (Dispersion Compesating Fiber), verificar el grado de mejora de la señal.

Índices –Dispersión Cromática, ISI, BER, DCF, WDM, Optisystem.

I. INTRODUCCIÓN

LA fibra óptica es el medio de transmisión más utilizado actualmente para comunicaciones a largas distancias y altas velocidades; sin embargo, existen efectos indeseados, que podrían degradar la señal que atraviesa la fibra óptica, por lo que es de gran importancia analizar estos fenómenos, para poder controlarlos y en caso de ser necesario compensarlos, garantizando una mejor calidad de la señal óptica y así cumplir con los requerimientos de capacidad de las redes actuales de telecomunicaciones.

La dispersión cromática es uno de estos efectos que produce un ensanchamiento temporal de los pulsos ópticos pudiendo llegar a sobrelaparse pulsos adyacentes, generando interferencia intersímbolo (ISI) y aumentando la tasa de bit errados (BER) del sistema de comunicación.

II. MARCO TEÓRICO

A. Dispersión Cromática

La dispersión cromática es debida a los diferentes retardos de propagación que tienen las distintas

componentes espectrales del pulso transmitido, que viajan a diferentes velocidades. Esto puede ser causado por las propiedades dispersivas del material con el cual se fabrican las fibras y por los efectos ocasionados por la guía de la estructura de la fibra. Por consiguiente, la dispersión cromática tiene dos componentes: la dispersión de material y la dispersión de guía de onda.

Ambas componentes son de signo contrario, de tal manera que se puede utilizar una de ellas para cancelar la otra a determinada longitud de onda. En fibras G652, que tienen un perfil de índice de refracción escalonado, esto ocurre a 1310 nm como puede verse en la Fig. 1; sin embargo, a esta longitud de onda la atenuación de la fibra es alta, por lo que resulta poco atractivo trabajar en segunda ventana.

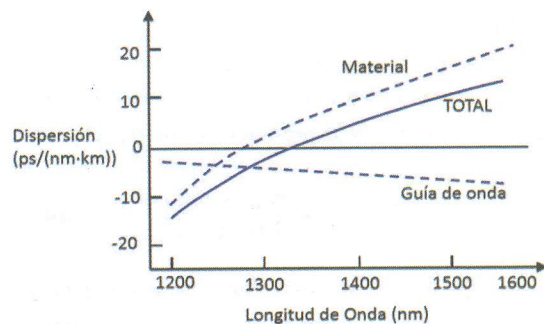


Fig. 1. Curvas de dispersión cromática en fibra G652

Es deseable mover la longitud de onda de dispersión cromática nula a tercera ventana, donde la atenuación de la fibra disminuye, para el efecto se utilizan perfiles de índice de refracción diferentes del escalonado, lo que originó las fibras de dispersión desplazada no nula (NZDSF, Non Zero Dispersion Shifted Fiber), G655, para las cuales el cero de la dispersión cromática se da ligeramente por arriba o por abajo de 1550 nm.

Considerando el espectro de un pulso con una frecuencia central ω_0 y que el ancho espectral de la fuente, $\Delta\omega$, sea mucho menor que la frecuencia central; se

puede describir la constante de propagación a través de la siguiente serie de Taylor [1]

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1)$$

Donde:

$$\beta_i = \left. \frac{d^i \beta}{d\omega^i} \right|_{\omega = \omega_0}$$

El parámetro β_0 , es la velocidad con la que se propaga la señal a la frecuencia central ω_0 , este parámetro no afecta a la señal moduladora, ya que una variación en la velocidad de fase, V_f , podría generar un desfase en la señal portadora pero nunca variaría la envolvente. A continuación se incluye la expresión para β_0 [1]

$$\beta_0 = \frac{\omega_0}{V_f} \quad (2)$$

Por otro lado, el parámetro β_1 es la velocidad de propagación de la envolvente de la señal modulada (velocidad de grupo V_g) y una variación de esta velocidad provocaría un retardo de la envolvente; es decir, produce un retardo de grupo (τ_g), a continuación se presenta la expresión que describe β_1 [1]

$$\beta_1 = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega = \omega_0} = \frac{1}{V_g} = \tau_g \quad (3)$$

El parámetro β_2 es conocido como dispersión de velocidad de grupo; cuando este parámetro tiene un valor considerable, la señal puede sufrir deformaciones debido a la dispersión, la siguiente expresión describe β_2 : [1]

$$\beta_2 = \left. \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \right|_{\omega_0} = \left. \frac{\partial \beta_1}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} = \left. \frac{\partial \tau_g}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \quad (4)$$

El parámetro que se usa para describir la dispersión cromática D , se define como la pendiente de la recta formada por el retardo de grupo, respecto a la longitud de onda; y se define con la siguiente expresión: [1]

$$D = \left. \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda} \right|_{\lambda_0} \quad (5)$$

Si se relacionan las expresiones de β_2 y D , se obtiene la siguiente expresión:

$$D = \left. \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \right|_{\omega_0} \cdot \beta_2 \quad (6)$$

Si se considera que $\partial \omega \ll \omega$ y que $\partial \omega \approx \Delta \omega \approx \omega_2 - \omega_1$, entonces $(\lambda_2 - \lambda_1)$ es un valor muy pequeño y se puede llegar a la siguiente expresión final para la dispersión: [1]

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \beta_2 \quad (7)$$

También se debe considerar el efecto de la dispersión cromática de segundo orden β_3 , que depende de la velocidad de transmisión y que está relacionada con la pendiente de dispersión S , y viene expresada de la siguiente manera: [1]

$$S = \frac{(2\pi c)^2}{\lambda^4} \beta_3 \quad (8)$$

Para calcular el ensanchamiento ΔT que sufre un pulso por efectos de la dispersión cromática, se emplea la siguiente ecuación: [1]

$$\Delta T = |D| * L * \Delta \lambda \quad (9)$$

Donde:

D : coeficiente de dispersión cromática de la fibra dado en ps/nm*km

L : longitud de la fibra de transmisión

$\Delta \lambda$: anchura espectral de la fuente de luz

La dispersión cromática limita la capacidad del sistema de comunicaciones ópticas; a fin de controlar su afectación, se recomienda cumplir el siguiente criterio de calidad: [1]

$$B * L * |D| * \Delta \lambda < 1 \quad (10)$$

Mediante (10) se puede conocer la velocidad de transmisión B y la distancia necesaria L , para que la dispersión cromática no afecte a la señal que atraviesa el enlace óptico.

1) Dispersión Cromática de Material

Todo material, presenta propiedades que dependen de la longitud de onda de la radiación que pase por dicho material; así, el índice de refracción del núcleo de la fibra toma diferentes valores, dependiendo de la frecuencia de la onda electromagnética que lo atraviesa; es decir, que el índice de refracción es dependiente de la longitud de onda, de modo que los rayos de la luz de diferente longitud de onda viajan a diferentes velocidades experimentando distintos retardos dentro de la fibra, dando como resultado un ensanchamiento de los pulsos ópticos.

La dispersión cromática de material aumenta con la longitud de la fibra de transmisión, pero su efecto puede ser reducido utilizando fuentes de luz con una anchura espectral estrecha, como láseres de buena calidad.

El coeficiente de dispersión de material D_m de una fibra a una determinada longitud de onda λ viene dado por (11). [1]

$$D_m \equiv -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \left[\frac{ps}{nm.km} \right] \quad (11)$$

Donde:

n : índice de refracción

c : velocidad de la luz en el vacío.

2) Dispersión Cromática de Guía de Onda

En una fibra monomodo no toda la energía lumínica se propaga por el núcleo, parte de ella lo hace por el manto. Así, aproximadamente el 80% de la energía que se propaga a través de la fibra está contenida en el núcleo; mientras que el resto de la energía se propaga a través del manto a mayor velocidad, ya que tiene un índice de refracción menor (n_2), con respecto al del núcleo (n_1), llegando por tanto a diferentes tiempos al extremo receptor, lo cual provoca un ensanchamiento o dispersión en los pulsos que viajan por la fibra óptica.

El valor de la dispersión de guía de onda, está relacionada con la frecuencia normalizada de la fibra V , que depende entre otros parámetros del diámetro del núcleo de la fibra y que para fibras monomodo es menor a 2.4. [1]

El coeficiente de dispersión de guía de onda viene dado por (12). [1]

$$D_g = -\frac{LV}{c} (n_1 - n_2) \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (12)$$

Donde:

V : Frecuencia normalizada de la fibra

Vb : Constante de propagación normalizada

L : Longitud de la fibra de transmisión

B. Compensación de la Dispersión Cromática con fibras DCF (Dispersion Compensating Fiber, DCF)

La principal característica de las fibras compensadoras de dispersión, es que poseen un valor de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de las fibras de transmisión, a fin de compensar con pocos metros de la fibra DCF, la dispersión de la fibra que se utiliza para la transmisión, generalmente trabajan en tercera ventana.

De esta manera, si se tiene un enlace de fibra óptica, es posible compensar la dispersión cromática acumulada, colocando segmentos de determinada longitud de fibra DCF cada cierto tramo de la fibra de transmisión, en diferentes configuraciones tal como se aprecia en la Fig. 2.

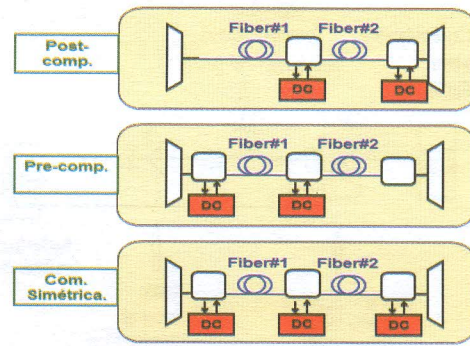


Fig. 2. Tipos de configuraciones para compensación de la CD con fibra DCF [2]

III. SIMULADOR UTILIZADO

A. Esquema General de Simulación

Para realizar el estudio de la dispersión cromática se utilizó OptiSystem y un esquema general de simulación con los siguientes componentes: Generador de la señal de entrada, fibra Óptica y elementos de visualización

1) Generador de la señal de entrada

Para obtener la señal de entrada se utilizó un generador de pulsos gaussianos (*Optical Gaussian Pulse Generator*), a partir de una secuencia binaria obtenida de un generador de secuencia de bits definidos por el usuario (*User Defined Bit Sequence generator*).

Se utilizó pulsos gaussianos para mayor facilidad en la visualización del ensanchamiento del pulso producido por la dispersión cromática.

2) Fibra Óptica

El componente de fibra óptica (*Optical Fiber*), simula el efecto de propagación de un campo óptico en una fibra óptica monomodo, con las características propias de la fibra tales como los efectos dispersivos, entre los cuales se encuentra la dispersión cromática.

3) Elementos de Visualización

Estas herramientas permiten visualizar las señales ópticas de entrada y de salida del enlace a simular, y así comparar los cambios que sufre la señal por efecto de la dispersión cromática. Los visualizadores utilizados en la simulación son Default Time Domain Visualizer y Dual Port Optical Time Domain Visualizer.

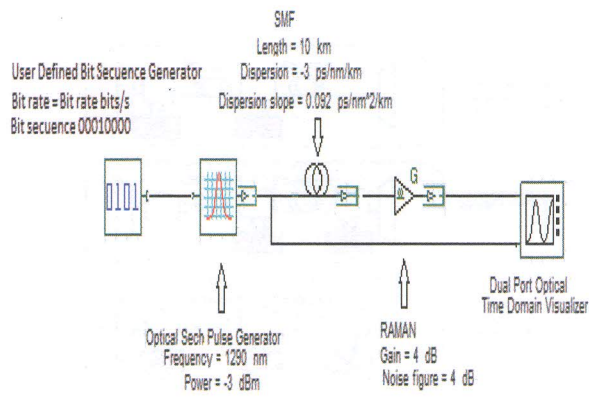


Fig. 3. Esquema general de la simulación

IV. SIMULACIÓN DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA

Para realizar las simulaciones del fenómeno de dispersión cromática, se consideró velocidades de transmisión de 2.5, 10 y 40 Gbps para la fibra G.652D y hasta 160 Gbps para el estándar G.655C y E. También se varió la distancia considerando los valores de 10, 20, y 40 kilómetros, para la fibra G.652D en segunda ventana y, 10, 50 y 80 kilómetros en tercera ventana; mientras que para la fibra ITU-T G.655C y E en tercera ventana, se consideró distancias de 100, 500, 1000 y 2000 kilómetros.

Los proveedores de servicios de telecomunicaciones locales esencialmente utilizan fibras ópticas normalizadas G652 preferencialmente en sus redes de acceso y, fibras G655 en sus sistemas de mayor alcance como son las redes troncales con WDM. En su infraestructura de tendido de fibra suelen utilizar compensación de dispersión cromática (módulos DCF) cada cierto tramo, sin haber explorado otros mecanismos para mitigar la dispersión cromática en sus redes ópticas. En tal virtud se decidió trabajar con estos dos tipos de fibras en este estudio.

Adicionalmente, las velocidades a las que operan las redes de los proveedores de servicios de telecomunicaciones locales llegan típicamente hasta 40 Gbps y en pocos casos a 100 Gbps, por lo que en este estudio se cubrieron estas velocidades y se exploró hasta 160 Gbps. Respecto de las distancias de transmisión, se consideraron aquellas de alcance nacional y regional.

A. Simulación de la CD para la fibra G.652 D

La fibra G.652D trabaja en segunda (1310nm) y tercera ventana (1550nm), por lo que se consideraron las especificaciones del estándar para cada caso a fin de configurar los parámetros adecuados en el componente de fibra óptica.

1) Segunda Ventana, $\lambda=1340\text{ nm}$

Los valores de distancias y de velocidad de transmisión, para el estándar G.652D en segunda ventana, se han considerado de acuerdo a las aplicaciones que puede soportar dicho estándar, según la recomendación ITU-T G.959.1, que especifica las características de las interfaces de capa física de red óptica. La expresión que se utilizó para el cálculo del coeficiente de dispersión cromática de esta fibra es (13). [4]

$$\frac{\lambda_{0min}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq Dc(\lambda) \leq \frac{\lambda_{0max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Donde:

$Dc(\lambda)$: Dispersión cromática en ps/nm*km

λ : Longitud de onda de operación

S_{0max} : Pendiente de dispersión máxima en ps/nm²*km

S_{0min} : Pendiente de dispersión mínima en ps/nm²*km

λ_{0max} : Longitud de onda máxima

λ_{0min} : Longitud de onda mínima

Aplicando (13) y de acuerdo a los valores de estos parámetros para la fibra en consideración, tomados de las especificaciones del estándar, ITU-T G.652D, se obtuvo:

$$1.15 \frac{ps}{nm * km} \leq Dc(\lambda) \leq 3.52 \frac{ps}{nm * km}$$

Se consideró un valor de dispersión cromática para la simulación de 3.52 ps/nm*km, ya que es el máximo valor de dispersión cromática según los cálculos realizados cuando se trabaja a una longitud de onda de 1340 nm y, una atenuación de 0.4 dB/km, de acuerdo a las especificaciones del estándar.

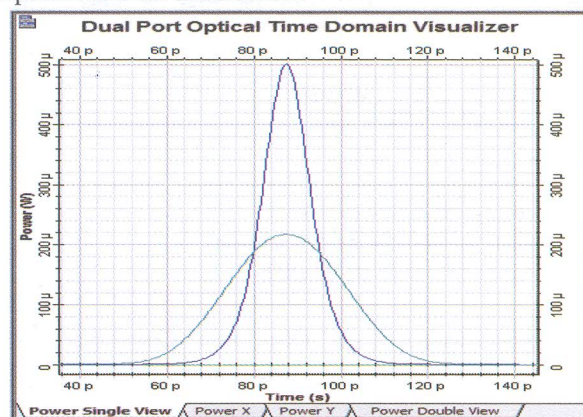


Fig. 1. Pulso original (azul), pulso de salida (turquesa) con fibra ITU-T G.652D de longitud 40 km y Vtx de 40 Gbps, operando a 1340nm.

En la Fig. 4, se puede apreciar el efecto de la CD, dado que el pulso de salida (turquesa) sufre un ensanchamiento comparado con el pulso de entrada (azul), cuando se trabaja con una distancia de 40 km y una velocidad de transmisión de 40 Gbps; además como el pulso se ensancha, la amplitud del mismo disminuye, esto sucede porque la energía del pulso ensanchado, debe ser igual a la del pulso original.

Basándose en los resultados de las simulaciones realizadas en [7], en la tabla I se presenta el porcentaje de

ensanchamiento que sufre el pulso óptico debido a la dispersión cromática, para la fibra G.652D en segunda ventana, a una velocidad de 40 Gbps, y distancias de 10, 20 y 40 km.

TABLA I
ENSANCHAMIENTO DEL PULSO ÓPTICO PARA FIBRA G.652D EN SEGUNDA VENTANA

Velocidad de Transmisión (Gbps)	10 km	20 km	40 km
40	27%	63%	>100%

2) Tercera Ventana, $\lambda=1565$ nm

Para la fibra G.652D, trabajando en tercera ventana, se consideró el valor del coeficiente de dispersión cromática de 17 ps/nm•km y una atenuación de 0.275 dB/Km, parámetros dados en el estándar G.652D.

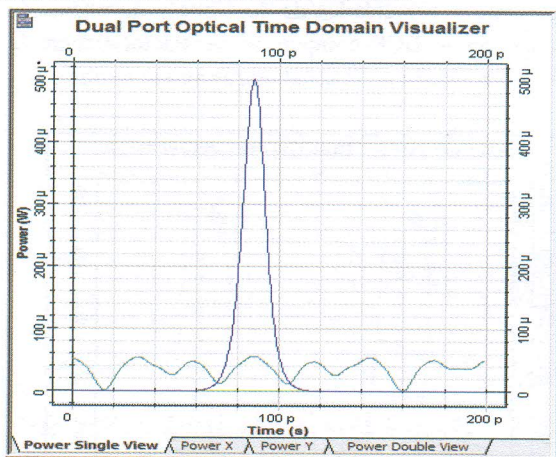


Fig. 2. Pulso original (azul), pulso de salida (turquesa) con fibra ITU-T G.652D de longitud de 80 km y Vtx de 40 Gbps, operando a 1565 nm.

Como se puede apreciar en la Fig. 5, para una distancia de 80 kilómetros y una velocidad de 40 Gbps, la dispersión cromática ha afectado de tal manera al pulso, que este ha perdido la forma de su envolvente original.

Con base en los resultados de las simulaciones realizadas en [7], en la tabla II se presenta el porcentaje de ensanchamiento del pulso óptico producido por la CD, para la G.652D en tercera ventana a velocidades de 10 Gbps y 40 Gbps y distancias de 10, 40 y 80 km. Se debe tomar en cuenta que para algunos casos el pulso óptico pierde la forma de su envolvente original, las letras PE (Pierde Envolvente) indican cuando aquello ocurre.

TABLA II
ENSANCHAMIENTO DEL PULSO ÓPTICO PARA LA FIBRA G.652D EN TERCERA VENTANA

Velocidad de Transmisión (Gbps)	10 km	40 km	80 km
10	6 %	50 %	100 %
40	>100 %	PE	PE

B. Simulación de la CD para la fibra G.655 C

Para la simulación con la fibra G.655 C, en tercera ventana, se tomó el valor máximo del coeficiente de

dispersión cromática que es de 10 ps/nm•km y una atenuación de 0.35 dB/Km, con una longitud de onda de 1565 nm, estos datos se encuentran descritos en el estándar G.655. [5]

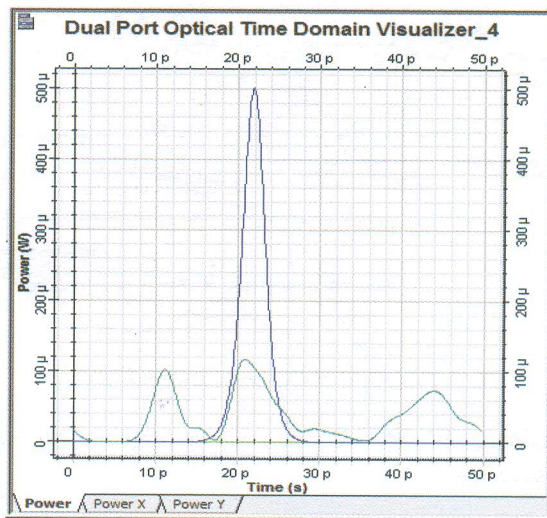


Fig. 3. Pulso original (azul), señal de salida (turquesa) con fibra ITU-T G.655C de longitud 2000 km y Vtx de 160 Gbps, operando en 1565 nm

En la Fig. 6, con una distancia de 2000 kilómetros y una velocidad de 160 Gbps, la dispersión cromática ha afectado de tal manera al pulso, que este ha perdido la forma de su envolvente original, puesto que la CD tiene mayor afectación conforme aumenta la distancia y la velocidad.

Con base en los resultados de las simulaciones realizadas en [7], en la tabla III se presenta el porcentaje de ensanchamiento del pulso óptico para la fibra G.655 C, operando a velocidades de 2.5, 10, 40 y 160 Gbps y distancias de 100, 500, 1000 y 2000 km.

TABLA III
ENSANCHAMIENTO DEL PULSO ÓPTICO PARA FIBRA G.655C

Velocidad de Transmisión Gbps	100 km	500 km	1000 km	2000 km
2,5	-	6 %	73 %	>100%
10	73 %	>100%	PE	PE
40	PE	>100%	>100%	PE
160	PE	PE	PE	PE

C. Compensación de Dispersión Cromática con fibras DCF

Considerando que la velocidad máxima, con la que se trabajará en este proyecto es de 160 Gbps y la distancia máxima es de 2000 km para la fibra G.655C, condiciones en las cuales se espera una degradación importante de los pulsos ópticos por CD, se utilizó la técnica de compensación con fibras DCF (Dispersion Compesating Fiber), puesto que este método es apto para compensar la dispersión cromática cuando se tienen redes de gran alcance y altas velocidades. Estas fibras DCF pueden

tener un valor de dispersión cromática muy elevada que va desde ± 80 ps/nm·km hasta alrededor de ± 1000 ps/nm·km [8]. En la Fig. 7 se presenta el esquema de compensación con fibras DCF utilizado.

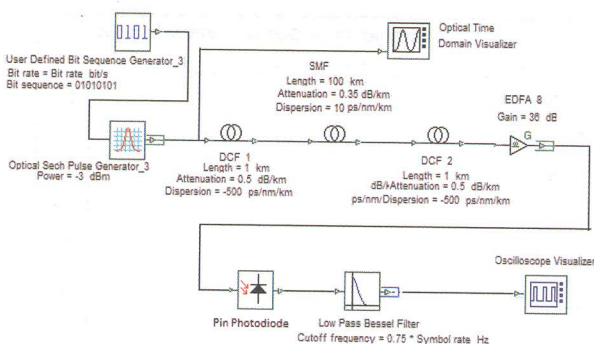


Fig. 4. Esquema de compensación con fibras DCF

1) Cálculo del valor de dispersión en las fibras DCF a utilizarse

Dado que las fibras DCF presentan un alto valor de atenuación, se consideró tomar solo la longitud mínima requerida de esta fibra para evitar grandes pérdidas, generalmente la longitud de la fibra DCF requiere ser como máximo 1/6 a 1/7 de la fibra de transmisión, pero se pueden utilizar segmentos menores para evitar el aumento de pérdidas.

Se utilizó (14) para calcular de dispersión cromática que debe tener la fibra DCF, para cada uno de los casos con los estándares ITU-T G.652 e ITU-T G.655. [6]

$$D_{CDF} = - \left(\frac{L_{FO}}{L_{CDF}} \right) * D_c \quad (14)$$

Donde:

- L_{FO} : Longitud de la fibra de transmisión
- L_{CDF} : Longitud de la fibra de compensación DCF
- D_c : Dispersión cromática en la fibra de transmisión
- D_{CDF} : Dispersión cromática en la fibra DCF

En la tabla IV, se presentan los valores de dispersión cromática para las fibras G.652D y G.655C, así como los valores de dispersión que deben tener las fibras compensadoras de dispersión cromática (DCF) a utilizarse, calculados con la ecuación (14).

TABLA IV

VALORES DE DISPERSIÓN CROMÁTICA DE LA FIBRA DE TRANSMISIÓN Y DE LA FIBRA DCF A UTILIZARSE

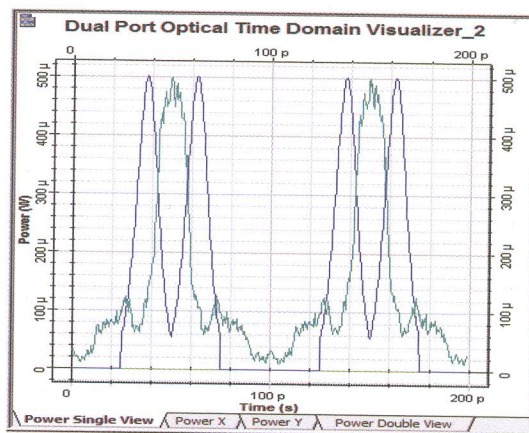
	ITU-T G.652D (1310 nm)	ITU-T G.652D (1550 nm)	ITU-T G.655C (1550 nm)
CD de fibra de transmisión	3,52 ps/nm·km	17 ps/nm·km	10 ps/nm·km
CD de fibras DCF	-140 ps/nm·km	-425 ps/nm·km	-500 ps/nm·km

2) Compensación DCF para fibras G.652D en segunda ventana

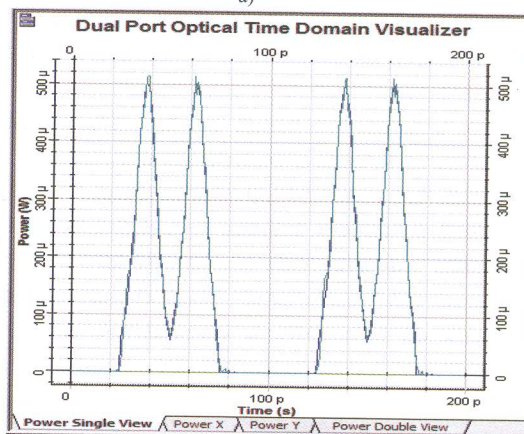
Para la compensación de la dispersión cromática con fibras G.652D en segunda ventana, se tomó en cuenta el valor de dispersión de la tabla IV.

En la Fig. 8 a) se observa que la secuencia de salida (turquesa), ha sido degradada debido a la dispersión cromática. Mientras que para la Fig. 8 b), utilizando el método de compensación de dispersión cromática con fibras DCF, la forma de los pulsos de salida es similar a la secuencia original, cuando se trabaja con distancias de 40 km y una velocidad de transmisión de 40 Gbps. En la simulación se utilizó 1km de fibra DCF por los 40 km de la fibra de transmisión.

Por tanto a velocidades de 40 Gbps y distancias de 40km, las fibras DCF compensan satisfactoriamente la dispersión cromática en la señal que atraviesa la fibra.



a)



b)

Fig. 5. Secuencia original (azul), secuencia de salida (turquesa) con longitud de 40 km, Vtx de 40 Gbps, 2ª. Ventana. a) Sin compensación y b) Con compensación DCF. Secuencia original= 01100110

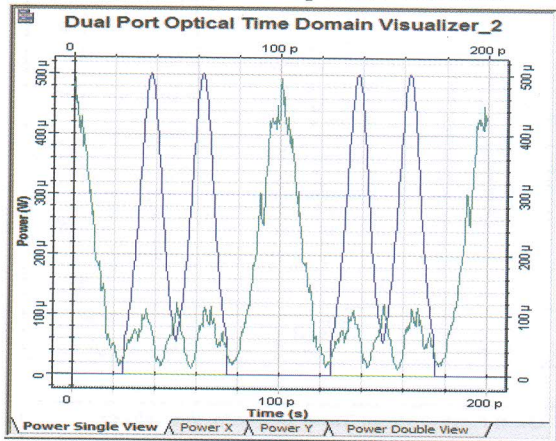
3) Compensación DCF para fibra G.652D en tercera ventana

Para compensar la dispersión cromática con las fibras DCF con el estándar ITU-T G.652D en tercera ventana, se

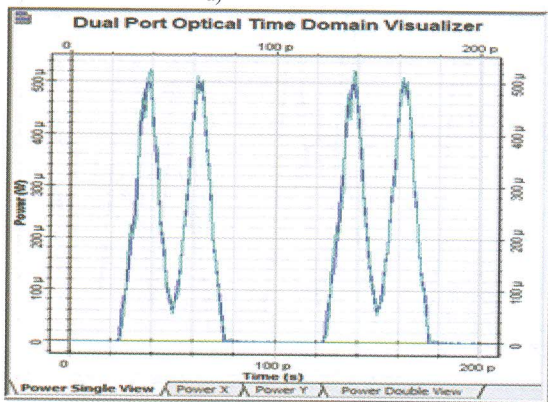
tomó en cuenta el valor de dispersión de la tabla IV. Se consideró una longitud de 2 km de fibra DCF, que compense la dispersión cromática de 50 km de la fibra de transmisión.

Para el caso que se presenta en la Fig. 9 a), la secuencia de salida es diferente a la secuencia original, debido a los ensanchamientos de cada pulso producidos por la dispersión cromática, esto generará errores en recepción, pues no se podrá identificar la secuencia original a menos que se utilice un método de compensación de la dispersión cromática.

En la Fig. 9 b), después de utilizar el método de compensación de la CD con fibras DCF, la señal de salida presenta la misma forma que la señal original. Es decir, para este caso la compensación con fibras DCF, funciona de manera correcta, ya que permite restaurar la señal que había sido degradada por la dispersión cromática.



a)



b)

Fig. 6. Secuencia original (azul), secuencia de salida (turquesa) con longitud de 80 km, Vtx de 40 Gbps, 3ª Ventana. a) Sin compensación y b) Con compensación DCF. Secuencia original= 01100110

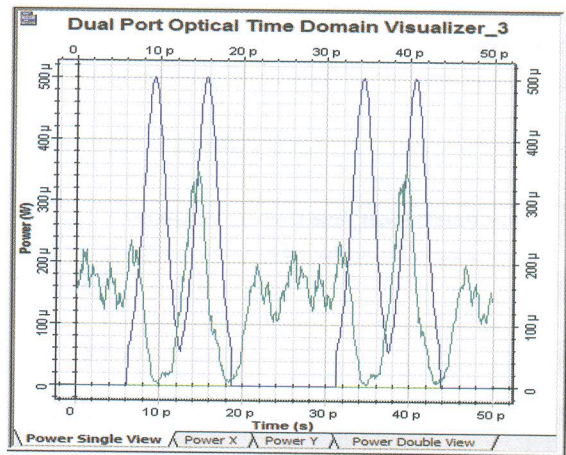
Tomando en consideración los resultados obtenidos en [7], en la tabla V se presentan los casos de compensación de dispersión cromática con fibras DCF, donde la expresión “comp.”, significa señal compensada. Para distancias de 10 km y velocidades de 10 Gbps, la señal no sufre degradaciones significativas debido a la CD, por lo que a esta velocidad y distancias menores a 10 km no es necesario utilizar compensación DCF.

TABLA V
COMPENSACIÓN DCF CON ITU-T G.652D EN TERCERA VENTANA

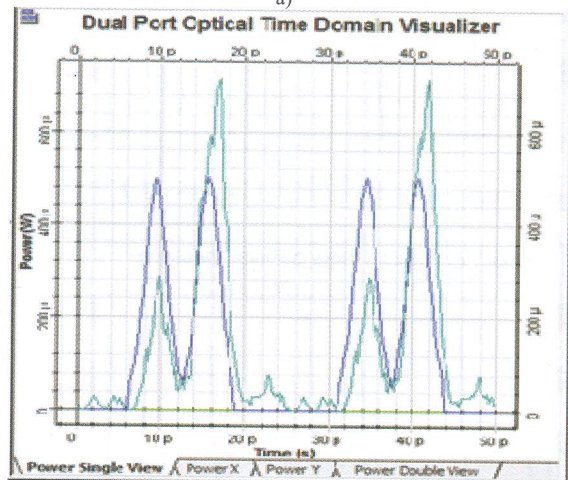
Velocidad de Transmisión (Gbps)	10 km	40 km	80 km
10	-	Comp.	Comp.
40	Comp.	Comp.	Comp.

4) Compensación DCF para fibra G.655C

En la Fig. 10 a), con 2000 Km y una velocidad de 160 Gbps, la señal de salida se ha distorsionado totalmente debido a la CD, resultando completamente diferente a la secuencia original, por lo que es mandatorio en estas condiciones utilizar métodos de compensación de dispersión cromática y de esta manera tratar de recuperar la secuencia original.



a)



b)

Fig. 7. Secuencia original (azul), secuencia de salida (turquesa) para 2000 km, 160 Gbps, 3ª. Ventana. a) Sin compensación y b) Con compensación DCF. Secuencia original= 01100110

Se utilizó una longitud de 2 km de fibra DCF para compensar la dispersión cromática de 100 km de la fibra de transmisión; sin embargo, como se observa en la Fig. 10 b), si bien la señal recupera la forma general de la secuencia original, se puede apreciar distorsión en la señal y un retardo de un par de picosegundos.

Tomando en consideración los resultados obtenidos en [7], en la tabla VI, se sintetizan algunos casos de compensación de dispersión cromática con fibras DCF.

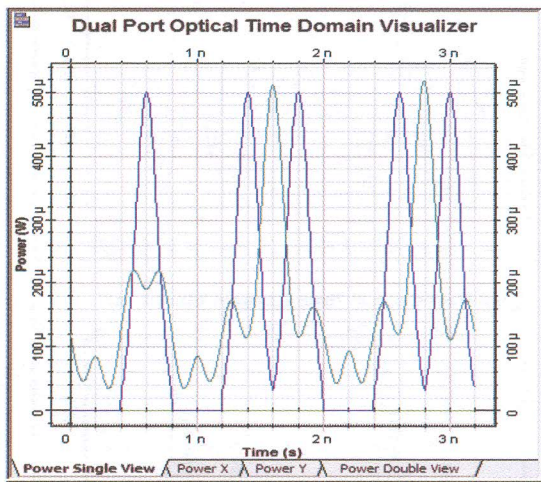
TABLA VI
COMPENSACIÓN DCF CON ITU-T G.655C

Velocidad de Transmisión Gbps	100 km	500 km	1000 km	2000 km
2,5	Comp.	Comp.	Comp.	Comp.
10	Comp.	Comp.	Comp.	Comp.
40	Comp.	Comp.	Comp.	Comp.
160	Comp.	Comp.	Comp.	Comp.

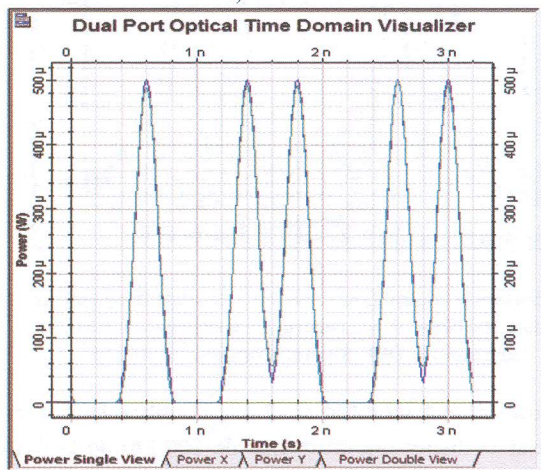
D. Análisis de Dispersión Cromática en Sistemas WDM

Para realizar un estudio completo de la dispersión cromática, se consideró también el caso de un sistema WDM (Wavelength Division Multiplexing), y así poder visualizar cómo afecta este fenómeno a sistemas multicanal utilizados en las comunicaciones ópticas.

1) Velocidad por canal 2.5 Gbps y distancia 2000 Km



a)



b)

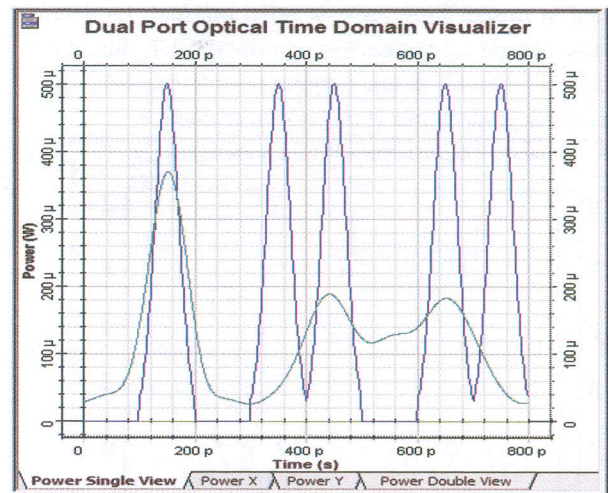
Fig. 8. Secuencia original (azul), secuencia de salida (turquesa) de un canal DWDM con longitud de 2000 km. a) Sin compensación y b) Con compensación DCF. Secuencia original= 01011011

Como se observa en la Fig. 11 a), para la secuencia de salida (turquesa), la señal sufre distorsiones debido a la

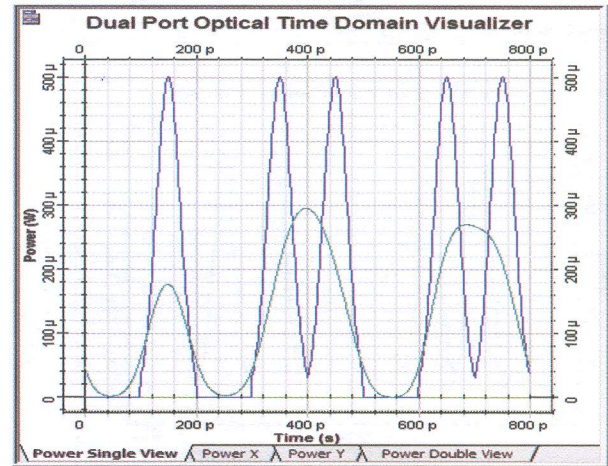
dispersión cromática, originando pequeños picos, que en recepción podrían ser considerados como unos, pero en realidad son ceros, provocando errores.

En la Fig. 11 b), se presenta la secuencia de salida del demultiplexor WDM (turquesa) después de utilizar fibras compensadoras DCF, consiguiendo compensar la dispersión cromática de la señal multiplexada, pues los pulsos prácticamente recuperan su forma original. Por tanto, el método de compensación utilizando fibras DCF, es efectivo bajo las condiciones dadas, pues permite recuperar la señal original

2) Velocidad por canal 10 Gbps y distancia 2000 Km



a)



b)

Fig. 9. Secuencia original (azul), secuencia de salida (turquesa) de un canal DWDM con longitud de 2000 km. a) Sin compensación y b) Con compensación DCF. Secuencia original= 01011011

Como puede observarse en la Fig. 12 a), a esta velocidad la señal sufre distorsiones a causa de la dispersión cromática. En la Fig. 12 b), se presentan los pulsos ópticos a la salida del demultiplexor (turquesa), luego de utilizar fibras DCF para compensar la dispersión cromática; si bien la señal no ha sido compensada totalmente y presenta una atenuación; sin embargo, el receptor podría identificar la secuencia original.

V. CONCLUSIONES

La dispersión cromática no solo afecta al ancho del pulso, sino que también genera atenuación en el mismo, es decir conforme se incrementa el ancho del pulso más atenuación tendrá el mismo, esto se debe a la redistribución de energía que experimentan los pulsos al sufrir un ensanchamiento.

La dispersión cromática en las fibras ópticas G.652D en segunda ventana, es baja y no presenta problemas de ensanchamiento cuando se trabaja con velocidades de 2.5 y 10 Gbps; sin embargo, cuando la velocidad aumenta a 40 Gbps y con distancias de 20 y 40 kilómetros, ocurre un aumento considerable en el ancho del pulso óptico, degradando la calidad del sistema. Por lo que es necesario emplear un método de compensación para restaurar la señal original.

Cuando se utiliza fibras G.652D en tercera ventana, se degradan de manera significativa los pulsos ópticos, afectando a los sistemas de comunicaciones ópticas que trabajen con velocidades de transmisión de 10 Gbps con distancias de 10, 50 y 80 kilómetros; además, al aumentar la velocidad a 40 Gbps el pulso óptico pierde totalmente la forma de su envolvente, debido al efecto de la dispersión cromática.

A pesar del alto valor de dispersión cromática presente en el estándar G.652D en tercera ventana, es de gran utilidad para realizar transmisiones con velocidades de 40 Gbps, ya que se puede compensar la dispersión cromática con fibras DCF.

La dispersión cromática afecta de manera significativa a las transmisiones de largas distancias, con el estándar G.655 en tercera ventana, donde los pulsos ópticos sufren un ensanchamiento a partir de velocidades de 2,5 Gbps y distancias de 1000 y 2000 km; por tanto, es útil emplear fibras con valores de dispersión cromática bajos para transmitir información a mayor velocidad y distancia, para que la calidad de la señal no sufra una degradación severa.

Las fibras G.655 son adecuadas para trabajar con altas velocidades y largas distancias, siempre y cuando se implemente un método de compensación de la dispersión cromática, para evitar la degradación de la calidad de la señal debido al aumento del ancho de los pulsos, conforme aumentan la velocidad de transmisión y la distancia. Así también, en estas condiciones siempre será importante utilizar fuentes de luz de reducida anchura espectral para disminuir la CD y su afectación en la calidad de la señal.

VI. REFERENCIAS

- [1] Baltasar Rubio Martínez (1994), Introducción a la Ingeniería de la fibra Óptica. RA-MA.
- [2] ITU. Dispersion compensation in fiber optical transmission. [Online]. www.itu.int/itudoc/itu-t/workshop/optical/s4am-p02_pp7.ppt

- [3] IBM Redbooks. IBM Redbooks. [Online]. http://imedea.uib-csic.es/~salvador/docencia/coms_optiques/addicional/ibm/ch07/07-15.htm
- [4] International Telecommunications Union (2016), Características de fibras y cables ópticos monomodo, G.652.
- [5] International Telecommunications Union, (2009). Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula, G.655.
- [6] R. B. Patel, and S. J. Patel M. G. H. Patel (2013). Dispersion compensation in 40 Gb/s WDM network using dispersion compensating fiber. Journal of Information, Knowledge and research in Electronics and Communication Engineering, vol. II, .
- [7] Paul Castañeda (2018). Análisis y Simulación del Fenómeno de Dispersión Cromática en las Fibras Ópticas Monomodo ITU-T G.652 E ITU-T G.655, Proyecto de Titulación, EPN.



Paulo Alejandro Castañeda Romero, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente se encuentra capacitándose en PHP y MySQL. Realizó prácticas pre-profesionales en la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, en el área de tarificación. Cursó los cuatro módulos de CCNA (Cisco

Certified Network Associated) en el CEC (Centro de Educación Continua) de la Escuela Politécnica Nacional.



María Soledad Jiménez Jiménez, Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional. Master of Science in Electrical Engineering, Universidad de Texas & Arlington – USA. Docente a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. Su campo de interés son las Comunicaciones Ópticas.