

Análisis de la Dispersión por Modo de Polarización en Fibras Ópticas Monomodo ITU-T G.652

Cadena P. Jorge G., Jiménez J. María S.

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional

Resumen— Este artículo se centra en el análisis matemático de uno de los tipos de dispersión que tiene lugar en fibras ópticas monomodo, la dispersión por modo de polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), que afecta a las comunicaciones por fibra hoy en día, especialmente al trabajar con velocidades de transmisión superiores a 10 Gbps y en largas distancias. El objetivo principal es analizar el nivel de dispersión y atenuación producido en diversos escenarios en los que se transporta una señal digital, a través de fibras ITU-T G.652, con parámetros variables de velocidad de transmisión, longitud de la fibra y coeficiente de PMD. Además, se compara los resultados teóricos obtenidos para diferentes escenarios, a través de expresiones matemáticas tomadas de diversas fuentes bibliográficas, con simulaciones efectuadas para los mismos escenarios usando OptiSystem en su versión 14.2, lo cual permite evaluar el impacto de PMD en una transmisión por este tipo de fibra.

Índices— Alteraciones de la señal óptica, Dispersión por modo de polarización, Fenómeno de dispersión, Transmisión de pulsos ópticos.

I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad la fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión más usado en redes y sistemas de telecomunicaciones de gran capacidad. Características como su amplio ancho de banda, alta inmunidad al ruido y a la interferencia por señales eléctricas, bajo nivel de atenuación en largas distancias, entre otras, hacen de la fibra el medio de transmisión ideal para satisfacer necesidades de conectividad, velocidad y disponibilidad en cualquier punto de una red de telecomunicaciones. Es por eso que, actualmente la fibra óptica ha remplazado en gran medida a los medios de transmisión convencionales como son el cable de cobre y los enlaces de radio fijos de largas distancias.

El rápido desarrollo de las técnicas de transmisión ópticas durante los últimos años, ha abierto nuevas posibilidades en el campo de los servicios de telecomunicaciones que a través del cable de cobre no estaban permitidas.

Sin embargo, debido a la creciente demanda de los servicios de telecomunicaciones, los sistemas deben soportar cada vez más volúmenes de información con un desempeño óptimo. Este incremento en la velocidad de transmisión provoca la aparición de nuevos fenómenos que alteran las señales ópticas transmitidas a través de un medio de fibra, generando errores en una transmisión e incrementando la tasa de bits errados

(BER, *Bit Error Rate*), fenómenos que no son apreciables a menores velocidades. Uno de estos, es la dispersión por modo de polarización (*Polarization Mode Dispersion*, PMD).

Se define a la PMD como el tipo de dispersión que afecta negativamente al pulso óptico que viaja a través de una fibra, provocando un ensanchamiento temporal del mismo, de manera similar a las dispersiones modal y cromática, pero generado por causas distintas. Así, este ensanchamiento se debe a la naturaleza birrefringente de la fibra óptica, la cual provoca que cada uno de los dos estados de polarización (*Principal States of Polarization*, PSP) de los que está compuesto el pulso de luz, “vea” diferente índice de refracción en su viaje a través del núcleo de la fibra y por lo tanto, llegue al otro extremo del enlace con diferentes tiempos de retardo [9]. La diferencia entre los retardos de cada estado de polarización se denomina retardo diferencial de grupo (*Differential Group Delay*, DGD) y es el parámetro que determina la magnitud de la PMD [8].

Este fenómeno de PMD contribuye por tanto a la aparición de la denominada interferencia entre símbolos (*Inter Symbol Interference*, ISI) y al incremento de la tasa de bits errados, limitando la capacidad de los sistemas de comunicación ópticos; de ahí la importancia de conocer su comportamiento para poder mitigarlo o contrarrestarlo apropiadamente y, de esa forma alcanzar mejores prestaciones y desempeño en estos sistemas.

Para este trabajo se consideró analizar el fenómeno de PMD en fibras monomodo estándar ITU-T G.652 D, dado que actualmente son las más instaladas en enlaces ópticos en redes de telecomunicaciones y se encuentran desplegadas en la mayoría de *backbones* y enlaces de proveedores en todo el mundo. Para el efecto se utilizaron parámetros de estas fibras obtenidos de datos de fabricantes, que se corresponden con los parámetros que especifica el respectivo estándar de la ITU-T.

En la sección II: “Fundamentos Teóricos de PMD”, se describe la PMD, sus causas y efectos, en base a fórmulas matemáticas obtenidas de diferentes fuentes bibliográficas, las mismas que describen el fenómeno de PMD, con resultados bastante parecidos a los reales.

En la sección III: “Cálculos y Simulación de PMD”, se muestran los resultados obtenidos para la dispersión por modo

de polarización del pulso óptico en diferentes escenarios, variando los parámetros de distancia, velocidad de transmisión y coeficiente PMD de la fibra, tanto analíticamente, como mediante las simulaciones realizadas, usando el Software OptiSystem 14.2.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN

A. Representación de la Polarización de la Luz

La polarización de una onda de luz, y en general de toda onda electromagnética, se clasifica de acuerdo a la forma en la que varía su vector campo eléctrico “E” en el tiempo y en el espacio, de esta manera se puede tener varios tipos de polarización, entre las cuales destacan, la polarización lineal, circular y elíptica.

El sistema de Jones permite representar luz polarizada por medio de una matriz 2x1 que se denomina “Vector de Jones” y cuyos elementos son las componentes normalizadas del campo eléctrico en los ejes (x,y) en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia. De esta forma, una onda de luz polarizada se expresa de la siguiente manera [8]:

$$\begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Siendo $e^{i\varphi_x}$ y $e^{i\varphi_y}$, el retardo de fase de las componentes de E en (x, y) respectivamente. Este vector determina la amplitud y fase de las componentes del campo E.

Comúnmente se representa el vector de Jones en función de la fase relativa. De esta manera, el vector de Jones quedaría expresado así:

$$E = \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} e^{i\varphi} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Si un haz de luz polarizada pasa a través de un material óptico lineal, la onda de luz resultante será una transformación lineal de la onda incidente. De esta manera, la transformación ocurrida puede describirse de acuerdo a la siguiente expresión [13]:

$$E_{out} = (J) E_{in} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} E_{x out} \\ E_{y out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & A_3 \\ A_4 & A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x in} \\ E_{y in} \end{pmatrix}$$

Siendo J, la denominada Matriz de Jones, que se usa para representar las propiedades ópticas de los diferentes medios ópticos lineales.

B. Birrefringencia y Acoplamiento de Modos

La birrefringencia en la fibra óptica es la causa principal de la PMD y se define como “la diferencia entre los índices de refracción de los ejes ortogonales de la fibra llamados también ejes de birrefringencia [13]”. Este parámetro viene dado por (4).

$$B = |n_x - n_y| \quad (4)$$

Donde n_x, n_y son los índices de refracción del núcleo de la fibra, correspondientes a los ejes (x, y).

Esta diferencia en los índices de refracción, se debe a la geometría imperfecta del núcleo, debido a los procesos de fabricación de la fibra, tensiones y esfuerzos aplicados en ella y diferencias de temperatura a las que puede estar sometida la fibra. Como consecuencia de esto, la geometría de la fibra no describe una circunferencia perfecta sino que se asemeja a la de una elipse.

En consecuencia, cuando un rayo de luz viaja a través de un segmento de fibra, el modo fundamental de propagación se divide en dos estados de polarización ortogonales independientes entre sí, correspondientes a los ejes (x, y) de su campo eléctrico. La energía del modo de propagación fundamental se reparte entre ambos estados y cada estado “ve” un índice de refracción diferente, viajando a diferente velocidad a través de la fibra y llegando al otro extremo de la misma con diferente tiempo de retardo [14], como se muestra en la Fig. 1.

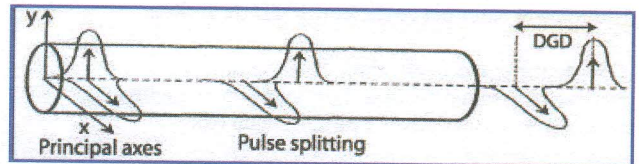


Fig. 1. Propagación de los dos estados de polarización de un pulso de luz a través de un segmento de fibra birrefringente. [1]

En segmentos de fibra muy cortos, el valor de birrefringencia y la orientación de sus ejes ortogonales son fijos. Sin embargo, esto no sucede en fibras de gran longitud como las que se usan en la mayoría de enlaces. Para estos casos, la magnitud de la birrefringencia de la fibra y la orientación de sus ejes ortogonales, sufren cambios y rotaciones aleatorias a través de su longitud y en el tiempo, lo que provoca intercambios y redistribuciones de energía entre los PSP del pulso de luz que se propaga a lo largo de la fibra.

Es posible modelar fibras de gran longitud como la concatenación de varios segmentos de fibra cortos de birrefringencia constante, cuya magnitud y dirección de sus ejes cambia aleatoriamente, como se muestra en la Fig. 2. A esta concatenación se conoce como acoplamiento de modos aleatorio y provoca que los PSP del pulso que se propaga

vienen adelantándose y retrasándose entre sí [8][12].

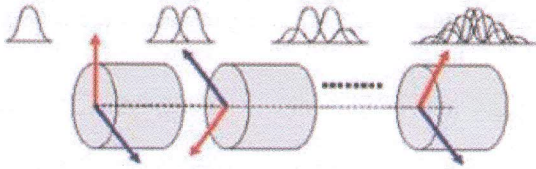


Fig. 2. Propagación de un pulso a través de varios segmentos de fibra birrefringentes. [8]

C. Retardo Diferencial de Grupo

Se define el Retardo Diferencial de Grupo (DGD), expresado como $\Delta\tau$ en ps, a la diferencia entre los tiempos de retardo de grupo de cada PSP de los que está compuesto un pulso de luz que se propaga a través de la fibra. Esta diferencia temporal causa ensanchamiento del pulso o dispersión.

En segmentos cortos de fibra, el DGD corresponderá a la diferencia en los tiempos de llegada de cada PSP, después de recorrer cierta distancia L . Según [1] se puede llegar a demostrar que la expresión matemática del DGD obedece a la relación (5).

$$\Delta\tau = L (\Delta\beta_1) \quad (5)$$

Siendo $\Delta\beta_1$, la diferencia entre la primera derivada de la constante de propagación de cada PSP, y que a la vez determina el valor del coeficiente PMD de la fibra.

Se define como coeficiente PMD, φ_{PMD} , al valor del DGD para cierta longitud de fibra L , dividido para dicha longitud y sus unidades están dadas en ps/km, según (6).

$$\varphi_{PMD} = \frac{\Delta\tau}{L} \quad (6)$$

Es decir:

$$\varphi_{PMD} = \Delta\beta_1$$

En segmentos de fibra de gran longitud (comúnmente usados en enlaces metropolitanos, nacionales e intercontinentales), debido al acoplamiento de modos aleatorio, se puede observar un DGD de naturaleza estocástica, siguiendo una curva de distribución de Maxwell, cuya PDF se indica en (7) según [8].

$$P(\Delta\tau) = \frac{32}{\pi^2} \frac{\Delta\tau^2}{(\Delta\tau)^3} e^{-\frac{4\Delta\tau^2}{\pi(\Delta\tau)^2}} \quad (7)$$

Esta distribución es controlada únicamente por el parámetro DGD promedio $\langle\Delta\tau\rangle$.

De acuerdo a [1] y [10], el coeficiente PMD en este tipo de fibras no depende linealmente de la longitud de la fibra L , sino que lo hace con la raíz cuadrada de dicha longitud y sus unidades son los ps/km^{1/2}. Su expresión matemática se

muestra en (8).

$$\varphi_{PMD} = \frac{\langle\Delta\tau\rangle}{\sqrt{L}} \quad (8)$$

La recomendación ITU-T G.663 “Características de los cables y Fibras Ópticas Monomodo”; indica que el DGD máximo para un segmento de fibra debe ser menor al 30% del tiempo de bit, t_B , de la señal transmitida, para que este no afecte de manera importante a la recepción e interpretación del pulso óptico. Sin embargo, en la práctica normalmente se establece un valor de DGD igual a la décima parte del tiempo de bit.

D. Representación de PMD en el sistema de Jones

El álgebra de Jones también permite modelar el comportamiento y las propiedades de un segmento de fibra birrefringente. El modelo Waveplate o Lámina de Onda ha sido usado en varias investigaciones como en [3] para describir las propiedades ópticas de una fibra birrefringente con excelentes resultados.

Este modelo considera una rotación y desfase aleatorio de los estados de polarización de la luz que atraviesa el medio. El efecto del retardador de fase es introducir una diferencia en los tiempos de llegada de cada componente ortogonal de polarización de la señal, además de un cambio en la fase de dichas componentes. El rotador de fase en cambio produce rotación en los ejes ortogonales de polarización de la señal que se propaga.

Matemáticamente una lámina de onda se expresa por (9) según [8].

$$J = \begin{pmatrix} e^{-i\omega\Delta t/2} & 0 \\ 0 & e^{i\omega\Delta t/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\varphi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

Donde θ es el ángulo de rotación de los ejes de birrefringencia de la fibra respecto a los ejes de la señal, φ es la diferencia de fase aleatoria producida entre las componentes ortogonales x e y , ambos ángulos relacionados con el acoplamiento de modos aleatorio, ω es la frecuencia angular y Δt es el valor del DGD del segmento de fibra.

De esta manera, se puede realizar el cálculo del pulso de luz a la salida de la fibra en base al pulso de entrada, de acuerdo a (3).

En caso de acoplamiento de modos aleatorio cada segmento birrefringente tendrá su propia Matriz de Jones y el modelado de la cadena de segmentos birrefringentes se puede realizar como la concatenación o producto ordenado de las respectivas matrices asociadas a cada segmento.

Si se toma una fibra con k segmentos birrefringentes, la respectiva matriz de Jones está dada por (10).

$$J(\omega) = \prod_{k=1}^K A_k(\omega) \tag{10}$$

Siendo $A_k(\omega)$, la matriz de Jones de cada segmento birrefringente de los que está compuesta la fibra.

III. CÁLCULOS Y SIMULACIÓN DE PMD

A continuación, se realizan los cálculos matemáticos de PMD para diferentes tipos de escenarios usando fibras monomodo, de acuerdo al estándar ITU-T G.652D, que ofrecen más ancho de banda que las categorías previas, toda vez que es una fibra del tipo ZWP (Zero Water Peak), en la que el pico de absorción por iones hidroxilo que produce gran atenuación cerca de los 1470 nm se ha reducido significativamente gracias a la mejora en las técnicas de fabricación de fibras, ampliando su zona de trabajo a banda E y S.

Se consideró en estos escenarios variar los parámetros de velocidad de transmisión y longitud de la fibra “L”, para analizar su incidencia en el PMD. Estos escenarios se encuentran a continuación descritos en la Tabla I.

TABLA I
ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DE PMD

Bit rate (Gbps)	Longitud de la fibra L (Km)	$\varphi_{PMD} = 0.25 \text{ ps/km}^{1/2}$
		10
40	500	
40	1000	
40	2000	

Posteriormente, se simulan dichos escenarios usando el software *OptiSystem* 14.2, cuyas características e instrucciones de uso se pueden encontrar en [11], todo esto con la finalidad de poder contrastar y analizar el impacto de la dispersión PMD en este tipo de fibras a diferentes velocidades de transmisión y longitudes de enlace. La Fig. 3 muestra el entorno de simulación para los diferentes escenarios considerados en este trabajo.

Con el objetivo de analizar la degradación que sufre un pulso óptico por efectos de la PMD, en todos los casos se trabaja con una señal de entrada correspondiente a un pulso gaussiano de potencia igual a 0 dBm, cuya descripción se puede encontrar en [4]. Se considera una frecuencia de la señal óptica de 193.1 THz, valor correspondiente a la frecuencia central de la tercera ventana de transmisión óptica (banda C), por ser una de las ventanas que más se utiliza en comunicaciones ópticas.

Esta señal atravesará un segmento de fibra óptica cuyos parámetros están relacionados con la recomendación ITU-T G.652D. El valor de coeficiente PMD escogido para todos los ejemplos es de $0.25 \text{ ps/km}^{1/2}$.

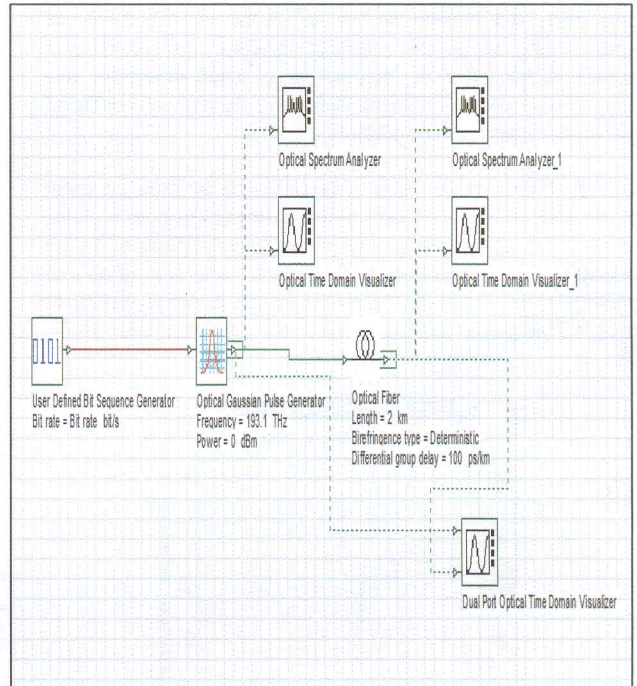


Fig. 3. Entorno de simulación de PMD.

Para poder analizar los resultados de la simulación, se monitorea la señal óptica en el dominio del tiempo, utilizando para tal efecto las gráficas correspondientes a los pulsos de entrada y salida de la fibra. En el entorno de simulación, se trata de emular el comportamiento de la fibra dado por (9) y (10), de modo que la fibra actúe como una lámina de onda compuesta de varios segmentos birrefringentes que alteren a la señal óptica que viaja por ella.

A. CASO 1: L = 500Km, Vtx= 10 Gbps

Para este primer caso, la longitud de fibra escogida es 500 Km, esta longitud es típica en enlaces *backbone* de fibra en redes core y transporte MPLS o de otras tecnologías. La velocidad de transmisión utilizada es de 10 Gbps, un valor muy común en canales de transmisión WDM. El valor del coeficiente PMD considerado inicialmente es $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$, este se encuentra establecido en la recomendación ITU-T G.652D para segmentos individuales de fibra.

Ya que en sistemas de comunicación por fibra de algunos kilómetros de longitud, el enlace está compuesto por varios segmentos de fibra, el coeficiente PMD tiende a aumentar, por esta razón, se ha determinado un máximo coeficiente PMD de $0,25 \text{ ps/km}^{1/2}$ para los cálculos. Cabe recalcar que en un caso real, el valor del coeficiente variará estadísticamente de acuerdo a una distribución gaussiana, cuyo valor central será

el obtenido en el cálculo teórico de acuerdo a (7).

El DGD teórico inducido en la fibra, se calcula aplicando la relación (8) y en este caso resulta ser $\Delta\tau=5.59$ ps, este valor para la velocidad de transmisión considerada es inferior a la décima parte del tiempo de bit del pulso. Por lo tanto, de acuerdo a [7], se puede entonces predecir que el sistema soportará dicho valor de dispersión, el cual producirá una mínima distorsión en la forma del pulso, lo que se verificará mediante la respectiva simulación.

La Fig. 4 muestra el pulso a la salida de la fibra en color azul, después de sufrir la dispersión, comparado con el pulso de entrada en color celeste, de acuerdo a la simulación en OptiSystem. Los resultados confirman que el nivel de dispersión y por tanto de degradación de la señal óptica es muy leve y se puede distinguir fácilmente en recepción dicha señal.

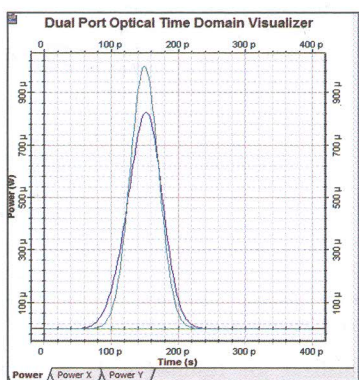


Fig. 4. Pulso de entrada (celeste) y pulso de salida afectado por dispersión PMD (azul), L=500Km, Vtx=10 Gbps y frecuencia 193.1THz

B. CASO 2: L = 500Km, Vtx= 40 Gbps

Para este segundo caso, se mantiene la longitud de fibra considerada para el análisis en 500 Km. La velocidad de transmisión se incrementa a 40 Gbps, un valor alcanzado en canales DWDM usados en la actualidad. El DGD teórico en este escenario se calcula de acuerdo a (8), y resulta ser de $\Delta\tau=5.6$ ps, un valor inferior a la tercera parte del tiempo de bit del pulso para esta velocidad de transmisión. Por lo tanto, se puede anticipar que el nivel de dispersión no afectará de manera considerable al pulso transmitido, lo cual se corroborará mediante simulación.

En este caso se considera para la simulación una secuencia de pulsos 01101011 a fin de analizar de forma más clara, el efecto de PMD en dicha señal óptica constituida por pulsos adyacentes. La Fig. 5 muestra la secuencia de pulsos transmitidos y obtenidos a la salida de la fibra, en azul, después de sufrir la dispersión, comparado con la secuencia de pulsos de entrada en celeste, de acuerdo a la simulación en OptiSystem. Los resultados confirman que el nivel de dispersión de la señal óptica no es elevado y por tanto se podrá distinguir fácilmente en recepción dicha señal.

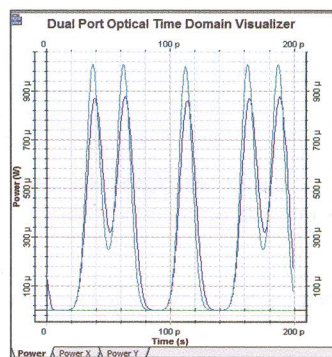


Fig. 5. Secuencia de pulsos de entrada (celeste) y secuencia de pulsos de salida afectados por PMD (azul). L=500Km, Vtx 40 Gbps y frecuencia 193.1THz.

C. CASO 3: L = 1000Km, Vtx= 40 Gbps

Para este caso se considera una longitud de fibra igual a 1000 Km, valor correspondiente a backbones internacionales, y una velocidad de transmisión de 40 Gps característica en sistemas multicanal DWDM. El DGD teórico en este escenario es $\Delta\tau=7,9$ ps, valor que supera a la tercera parte del tiempo de bit del pulso, para esta velocidad de transmisión. Por lo tanto, se anticipa que en este caso el PMD esperado será considerable, lo que degradará la señal a un nivel que afectará su reconocimiento en recepción.

La Fig. 6 muestra el resultado de la simulación en OptiSystem para este caso. La secuencia de pulsos a la salida de la fibra en azul, después de sufrir la dispersión, comparado con la secuencia de pulsos de entrada en celeste.

Como se puede observar, el nivel de dispersión es bastante considerable para este escenario, lo cual conllevaría a que sea necesario utilizar mecanismos de compensación de dicha dispersión para poder realizar la transmisión y garantizar una recepción adecuada en estas condiciones. Dichos mecanismos están basados, en su mayoría, en métodos dinámicos y procesamiento digital de señales, que permiten una eficiente compensación dada la naturaleza aleatoria de la PMD.

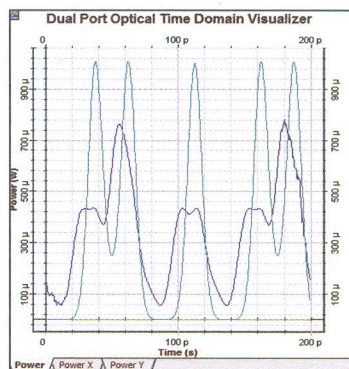


Fig. 6. Secuencia de entrada (celeste) y de salida afectada por PMD (azul). L=1000 Km, 40 Gbps y frecuencia 193.1THz.

D. CASO 4: $L = 2000\text{Km}$, $V_{tx} = 40\text{ Gbps}$

Para este escenario, se ha elevado la longitud de fibra a 2000 Km, que correspondería a escenarios de redes Ultra Long Haul, que se tienen por ejemplo en enlaces intercontinentales; además, se ha mantenido la velocidad de transmisión en 40 Gbps.

El DGD teórico calculado en este escenario es $\Delta\tau = 11,8\text{ ps}$, valor comparable con la mitad del tiempo de bit del pulso para esta velocidad de transmisión de 40 Gbps. Por lo tanto, el nivel de PMD esperado será bastante crítico y la degradación que experimentará la señal se presume será considerable, lo cual se verificará mediante simulación.

La Fig. 7. muestra la simulación en OptiSystem de una secuencia de pulsos a la salida de la fibra en azul, después de sufrir la dispersión, comparado con la secuencia de pulsos de entrada en celeste, para el caso descrito. Como se puede observar, la distorsión de la señal es bastante elevada, por lo que será muy difícil reconocerla en recepción, y será mandatorio en casos como este compensar dicha dispersión para posibilitar la transmisión y adecuada recepción bajo estas condiciones.

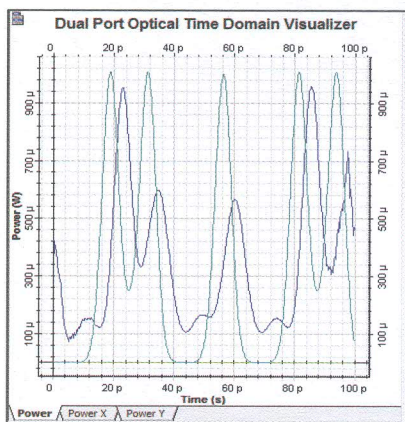


Fig. 7. Secuencia de entrada (celeste) y de salida afectada por PMD (azul). $L=2000\text{Km}$, 40 Gbps y frecuencia 193.1THz.

IV. CONCLUSIONES

De lo expuesto y de todas las simulaciones realizadas en [2], se puede afirmar que en fibras ITU-T G.652D, PMD es un fenómeno que empieza a ser apreciado en velocidades de transmisión a partir de los 10 Gbps, pero no es hasta valores superiores, del orden de los 40 Gbps que su efecto se vuelve considerable, siendo totalmente crítico en velocidades que superen estos valores.

Para velocidades de 10 Gbps, el nivel de PMD no afecta de manera significativa a la calidad de la transmisión en fibras monomodo estándar ITU-T G.652D, por lo tanto los pulsos no sufren distorsiones considerables, por tanto para velocidades menores a 10 Gbps el fenómeno de PMD no es de

consideración, tal y como se pudo comprobar con las simulaciones realizadas en [2].

Para velocidades de 40 Gbps, la PMD empieza a ser un problema cuando se trabaja con distancias superiores a los 500 km y coeficientes PMD relativamente altos como los considerados en este trabajo ($0,25\text{ ps/km}^{1/2}$), para menores valores de este coeficiente su efecto es mínimo, de ahí la importancia hoy en día de mejorar el diseño de las fibras y poder contar con fibras de bajo PMD.

En las simulaciones desarrolladas se observa que a mayor velocidad de transmisión y mayor longitud de la fibra, mayor será la dispersión. Sin embargo, debido a la naturaleza estadística de la PMD, pueden existir casos de gran dispersión con velocidades de transmisión y longitudes de fibra relativamente bajas y viceversa; y, mínima dispersión en escenarios con grandes longitudes de fibra y altas velocidades de transmisión, lo cual se corroboró en simulaciones realizadas que se pueden encontrar en [2].

El efecto de este tipo de dispersión, no solo generó ensanchamiento del pulso, sino también atenuación debida a la redistribución de la energía que experimenta el mismo. Además, en casos críticos llegó a degenerar totalmente la forma de la envolvente, haciendo que resulte imposible distinguir la señal de luz al otro extremo de la fibra, por lo tanto siempre será importante la inclusión de amplificadores ópticos que compensen las atenuaciones propias del sistema de comunicaciones (fibra, empalmes, conectores, splitters, entre otros dispositivos que se utilicen) y las provocadas por este tipo de dispersión.

En casos de dispersión severa, la forma de la envolvente del pulso sufre un nivel alto de degradación, estos casos se dan cuando el DGD producido es comparable con el tiempo de bit del pulso. Una buena forma de obtener una transmisión fiable, es asegurar que el DGD teórico no exceda a la tercera parte del tiempo de bit de la señal, tal como se establece en la recomendación de la ITU-T G.663 para fibras monomodo, lo cual fue verificado mediante las simulaciones realizadas.

Para los niveles de potencia usados en este trabajo, que corresponden a valores típicos utilizados en la práctica, la PMD no ha tenido efecto sobre las componentes de frecuencia de la señal que se propaga. Por lo tanto, la señal vista en el dominio de la frecuencia será la misma a la entrada y salida del segmento de fibra, tal como consta en [2].

Debido a su naturaleza estadística del fenómeno de PMD, el valor del DGD observado en un determinado caso, no será el mismo en todos. En enlaces reales, un valor medido en una determinada hora del día de este parámetro puede variar en la siguiente, lo cual dificulta la compensación de este tipo de dispersión.

REFERENCIAS

- [1] Agrawal, G. "Optical Communications Systems". Obtenido de <http://www.optics.rochester.edu/users/gpa/opt428b.pdf>
- [2] Cadena, J. "Análisis y Simulación del Fenómeno de Dispersión Por Modo De Polarización (PMD) en Fibras Ópticas ITU-T G.652". Quito: Escuela Politécnica Nacional. 2017

- [3] Elbers, J., Glingener, C., Duser, M., & Voges, E. “Modelling of Polarization Mode Dispersion in Single Mode Fibers”. Electronics Letters. 1991
- [4] GCO. “Dispersión de pulsos gaussianos con chirp”. 2006. Obtenido de http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_5_2.htm
- [5] Hetch, J. “Understanding Fiber Optics”. New Jersey, NJ: Prentice-Hall Inc. 1999.
- [6] Ingenia-T. “Dispersión por Modo de Polarización”. 2012. Obtenido de <http://lafibraoptica.com/las-fibras-opticas-dispersion-del-modo-de-polarizacion>
- [7] International Telecommunications Union ITU-T. “ITU-T G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable”. 2009
- [8] Leiva, A., Tarifeño, M., & Olivares, R. “Efectos de la Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en la Propagación de Pulsos a Través de Fibras Ópticas”. Revista chilena de ingeniería, 336-343. 2007
- [9] Martín Pereda, J. “Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones”. Madrid, España: Pearson Educación. 2004
- [10] Ondrej, K. “Modern telecommunication optical fibers”. 2010. Obtenido de <http://www.posterus.sk/?p=6830>
- [11] Optiwave. “Optisystem Getting Started”. 2013. Obtenido de <https://optiwave.com/uncategorized/optisystem-getting-started/>
- [12] Photonics. “Polarization Mode Dispersion: Concepts and Measurement”. 2012. Obtenido de <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25153>
- [13] Rodríguez Barrios, A. “Realización de Patrones de Dispersión del Modo por Polarización”. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2007
- [14] Rojas, L., Matheus, J., & Marín, J. “Estudio del Fenómeno de Dispersión por el Modo de Polarización de Onda (PMD) en Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica”. 2004. Obtenido de <https://slidedoc.es/estudio-del-fenomeno-de-dispersion-por-el-modo-de-polarizacion-de-onda-pmd-en-sistemas-de-comunicaciones-por-fibra-optica-pdf>

Eléctrica Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. Su campo de interés son las Comunicaciones Ópticas.



Jorge Gabriel Cadena Paredes. Nació el 25 de agosto de 1991. Obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional en el año 2017. Actualmente trabaja en el campo de las

Comunicaciones Celulares.



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