

Capítulo 5

Desempeño de un sistema óptico

Después de haber implementado y validado el simulador de un láser modulado directamente, se procedió a hacer simulaciones de propagación de pulsos ópticos a través de una fibra óptica, cuyo objetivo consiste en demostrar la mejor combinación de propiedades físicas del láser y la fibra óptica. Dicho estudio tiene como meta proporcionar la información detallada sobre los desempeños de los láseres estudiados en el capítulo anterior con el fin de escoger la mejor mezcla de dispositivos para un sistema óptico.

5.1. Características de transmisión

Para la transmisión de pulsos ópticos a través de una fibra óptica, existen diferentes fenómenos que denigran la calidad de la señal y limitan la capacidad de transmisión del sistema de comunicaciones. El primero de ellos es la atenuación, el cual consiste en que la señal pierde potencia al propagarse. Este descenso de potencia se debe a muchos factores, pero básicamente a la absorción del material con que está fabricada la fibra óptica y las dispersiones por efecto Rayleigh. La principal limitante que provoca la atenuación es la distancia máxima de propagación, esto, debido a que el receptor tiene un nivel mínimo en el que es capaz de interpretar la señal recibida, debajo de este umbral la información es indecifrible. El otro fenómeno que afecta de manera importante la calidad de la señal es la dispersión. La fibra óptica que se utilizó para la simulación corresponde al modelo de una fibra mono-modo, en la cual se propaga un sólo modo electromagnético; en este tipo de fibras ópticas, la dispersión predominante corresponde a la dispersión cromática.

La dispersión cromática radica en que al transmitirse un pulso óptico a través de una fibra óptica, dicho pulso puede considerarse como una combinación lineal de diferentes longitudes de onda. En la fibra óptica, el índice de refracción se encuentra en función de la longitud de onda, por lo que para cada una de

éstas hay una diferente velocidad de grupo. El resultado que se obtiene de esta dependencia ocasiona que al final de la fibra las componentes espectrales lleguen en tiempos diferentes ocasionando que el pulso se ensanche. La figura 5.1 ilustra el efecto producido por la dispersión cromática. En este esquema en especial, las diferentes longitudes de onda se expresan con dos colores: el azul que representa longitudes de onda pequeñas (λ_1); y el rojo representando longitudes de onda grandes (λ_2). En el esquema, la velocidad de propagación aumenta cuando la longitud de onda decrece.

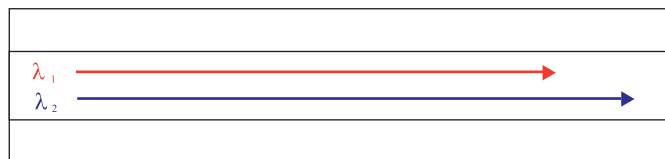


Figura 5.1: Dispersión cromática

Para el caso de transmisión de información, el efecto de ensanchamiento de los pulsos produce que haya interferencia entre los diferentes bits transmitidos, si el efecto de la dispersión es muy grande, el receptor no será capaz de comprender cual es un '1' y cual un '0'. La interferencia de este tipo se define como interferencia intersimbólica. La figura 5.2 muestra la manera en que la dispersión aumenta la interferencia intersimbólica y denigra la capacidad del sistema de comunicación. Entre mayor sea la distancia que recorre una señal por la fibra óptica, el pulso comenzará a salirse de su tiempo de ranura y ocupará el de bits aledaños, ocasionando que el receptor pueda interpretar la presencia de una señal de un bit aledaño como la que corresponde a ese tiempo de ranura, confundiendo así el valor del bit.

El signo de la dispersión indica cuales componentes espectrales se propagan más rápido. En el caso de las fibras de dispersión de signo negativo, conocida en la literatura como dispersión 'normal'; las componentes de longitud de onda pequeña (azules) viajan más lentamente que las de longitud de onda grande (rojas). Al contrario, en el caso de las fibras con dispersión positiva o 'anómala', las componentes de longitud de onda pequeña viajan más rápidamente que las de longitud de onda grandes. Para ilustrarlo mejor, la figura 5.3 muestra el efecto producido en las componentes espectrales de un pulso después de propagarse a través de una fibra óptica con dispersión (a) negativa y (b) positiva.

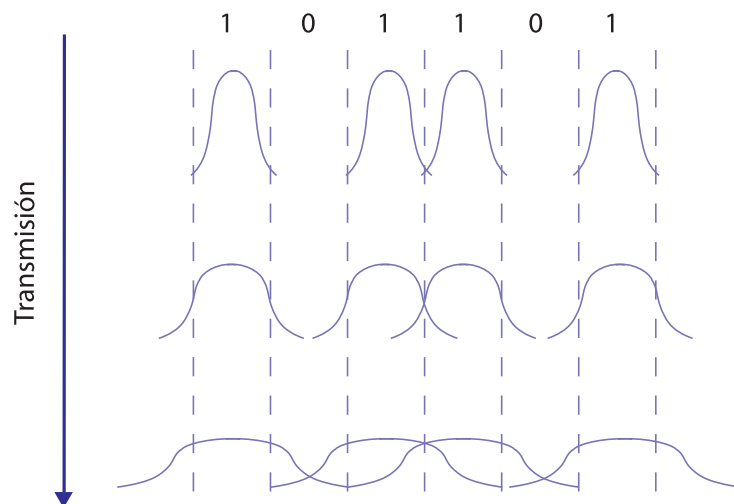


Figura 5.2: Efectos de la dispersión en la propagación de una cadena de pulsos ópticos

La importancia de distinguir dicho comportamiento radica en que la señal que produce el láser tiene *chirp* y los cambios de frecuencia no se presentan en forma simétrica en el pulso, por lo tanto, en el dominio del tiempo los efectos producidos por la dispersión y el *chirp* afectarán de forma relevante la calidad de nuestra señal al terminarse de propagar por la fibra óptica.

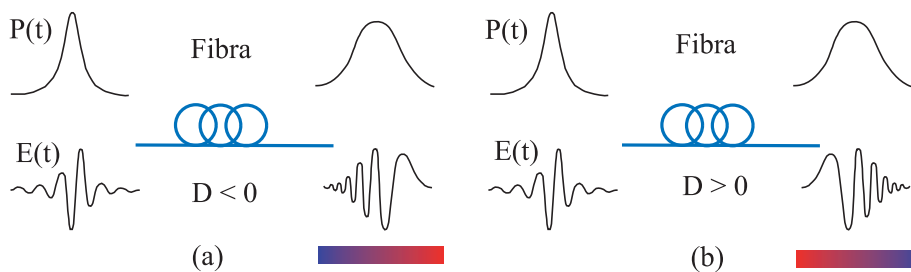


Figura 5.3: Interacción de las componentes espectrales con el tipo de dispersión de la fibra

5.1.1. Perfiles de dispersión de distintas fibras ópticas

Los valores de la dispersión son originados por dos factores principales: el material con el que están elaboradas las fibras ópticas y la distribución transversal del índice de refracción de la fibra. Por tales causas, el valor de la dispersión es diferente para cada tipo de fibra. La figura 5.4 muestra el perfil de dispersión para las fibras ópticas que se ocuparon en nuestras simulaciones: SMF (*Standar Single Mode Fiber*) y NZ-DSF (*Non Zero Dispersion Shifted Fiber*).

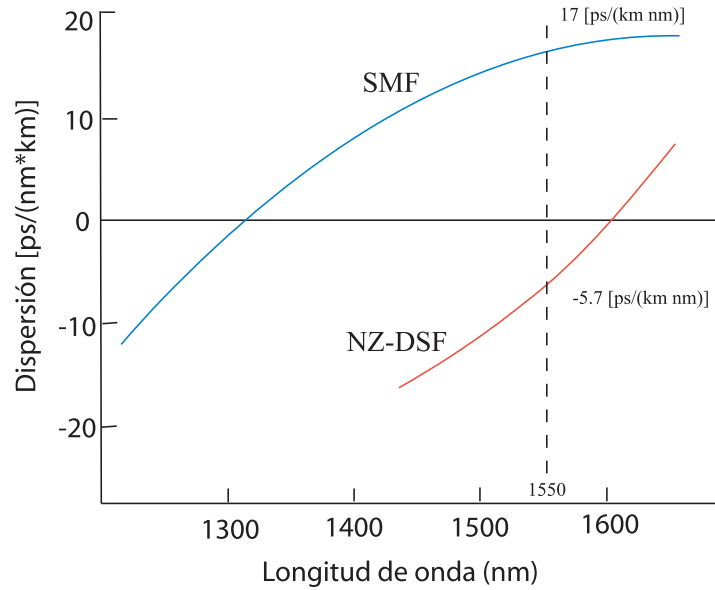


Figura 5.4: Perfiles de dispersión de las fibras SMF y NZ-DSF [35]

La longitud de onda de nuestro interés corresponde a los 1550 [nm] debido a que es la ventana de transmisión de menor atenuación. Respecto a las características de cada tipo de fibra, es menester enumerar las más importantes para cada una de éstas [11].

1. **SMF.** Conocida comercialmente como SMF-28 y producida por la compañía CorningTM. El estándar de esta fibra corresponde al ITU-T G.652. Su valor de dispersión nula ronda los 1310 [nm]; el valor de dispersión a 1550 [nm] corresponde a 17 [ps/(nm km)] y su atenuación es aproximadamente de 0.21 [dB/km]. Existen otras compañías que fabrican fibras similares y cumplen con el estándar mencionado.
2. **NZ-DSF** Mejor conocida con el nombre comercial de Metrocor y producida por la compañía CorningTM. Este tipo de fibra cumple los requerimien-

tos del estándar ITU-T G.655. El valor de dispersión nula se encuentra aproximadamente a los 1600 [nm]. En la longitud de onda de 1550 [nm] presenta un valor de dispersión de -5.7 [ps/(nm km)] y una atenuación de 0.23 [dB/km]. De igual manera que la SMF-28, existen otras compañías que fabrican fibras de características similares.

5.1.2. Interacción del *chirp* con la dispersión

El *chirp* se definió como el cambio de frecuencia de la señal. En el caso de los pulsos ópticos, el modelo matemático usado para caracterizar un pulso óptico Gaussiano con *chirp* se expresa en la ecuación 5.1 [5].

$$a(0, t) = A_0 \exp \left[-\frac{1 + iC}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \quad (5.1)$$

Donde tenemos que A_0 es la amplitud pico de potencia, C es el parámetro del *chirp* y T_0 representa la mitad de la anchura del pulso a una intensidad $1/e$ de la potencia pico. El valor del *chirp* determina qué tan rápido varía la frecuencia central del pulso con respecto al tiempo. El cambio de frecuencia se relaciona con la derivada parcial de la fase respecto al tiempo, como lo muestra la ecuación 5.2, por lo que el parámetro C representa, pues, la pendiente de un *chirp* que varía linealmente con el tiempo.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{C}{T_0^2} t \quad (5.2)$$

El ensanchamiento de un pulso óptico Gaussiano con *chirp* a través de una fibra óptica se determina mediante la ecuación 5.3 [9].

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

Donde T_0 y T_1 representan la mitad de anchura del pulso a una intensidad de $1/e$ de la potencia pico de entrada y salida respectivamente, mientras que z consiste en la distancia de propagación. El parámetro que indica la dispersión queda determinado por β_2 que se relaciona con el parámetro D en la expresión 5.4.

$$\beta_2 = -\frac{D\lambda^2}{2\pi c} \quad (5.4)$$

La relación T_1/T_0 es denominada como factor de ensanchamiento. Al graficar la ecuación 5.3 se vislumbra que el ensanchamiento de un pulso óptico tiene dos formas particulares de evolucionar. La primera se presenta cuando C y β_2 tienen signo igual ó $C = 0$, el pulso se ensancha progresivamente con la distancia de propagación. En cambio, cuando C y β_2 son de signos contrarios, el pulso se hace angosto hasta llegar a un valor mínimo, a partir del cual, cambia su

comportamiento y comienza a ensancharse. Los fenómenos antes descritos se plasman en la gráfica 5.5.

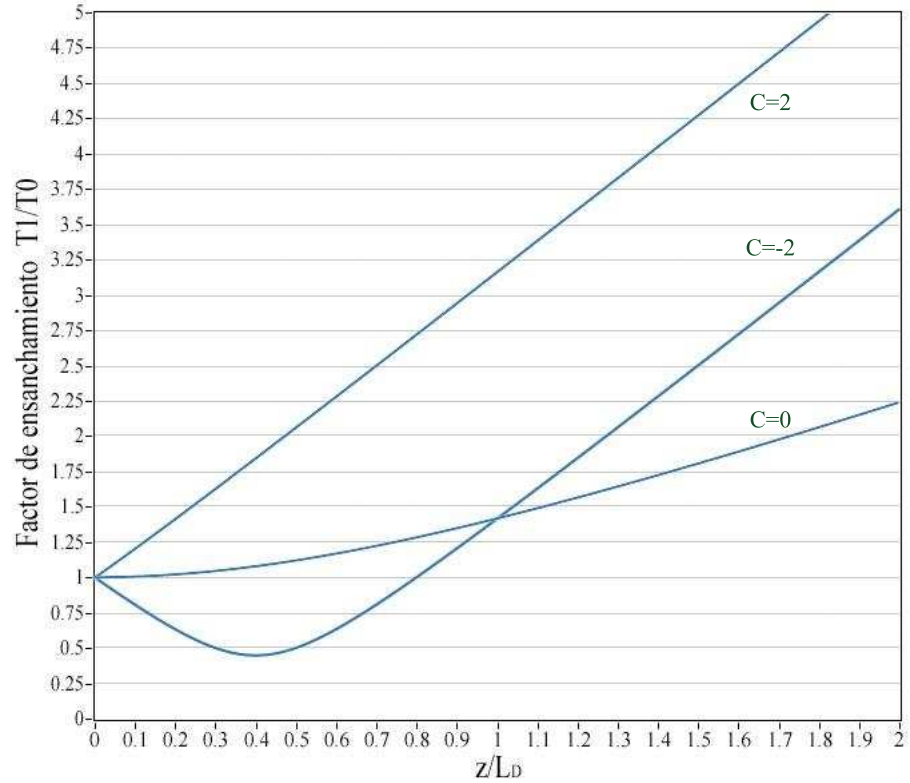


Figura 5.5: Factor de ensanchamiento para $\beta_2 = 2$ y diferentes valores de C

En la gráfica 5.5 L_D es considerada la longitud de dispersión y queda definida por $L_D = T_0^2/|\beta_2|$. En el caso que tengamos $\beta_2 C > 0$ el pulso Gaussiano se ensancha con una tasa de cambio mayor que un pulso sin *chirp*; en cambio, cuando se tiene $\beta_2 C < 0$, el ancho del pulso empieza a decrecer hasta un valor mínimo $z_{min} = [|C|/(1 + C^2)] L_D$, después de ese valor, el pulso se empieza a ensanchar con una tasa mayor que un pulso sin *chirp*. En el caso de los pulsos generados con láseres modulados directamente, éstos presentan por lo general un valor de *chirp* negativo [10]; por esa razón y con base en el análisis presentado para el caso del *chirp* lineal, se puede conjeturar que el valor de dispersión de la fibra óptica que presenta un mejor desempeño al usarse láseres modulados directamente debe ser $\beta_2 > 0$ y por lo tanto $D < 0$.

5.1.3. Pulsos ópticos propagándose por una fibra óptica

Los pulsos ópticos que produce un láser modulado directamente se encuentran lejos de ser pulsos Gaussianos; aunado a que el *chirp* que presentan no es lineal como en los pulsos ópticos estudiados en la subsección anterior. Por tanto, el análisis del comportamiento de los pulsos originados por un láser modulado directamente al propagarse por una fibra óptica debe realizarse numéricamente, dado que hasta nuestro conocimiento, no existe una solución analítica general. Así pues, en lo sucesivo analizaremos el efecto para cada tipo de *chirp*:

El *chirp* transitorio, como se mencionó en la subsección 3.6.1, presenta un aumento de la frecuencia en las transiciones de subida y una disminución en las transiciones de bajada. Si un pulso con *chirp* transitorio se propaga en una fibra de dispersión positiva, basándonos en que este tipo de dispersión provoca que las componentes de alta frecuencia se adelanten a las de baja frecuencia; las componentes que se encuentran al inicio de cada pulso, al ser de mayor frecuencia, avanzarán más rápido. El efecto que se producirá es que el pulso se haga más ancho creandose una abultación al frente de éste. En la parte final del pulso, como las componentes espectrales son de menor frecuencia, éstas se atrasarán y también provocaran una expansión del pulso en su parte final de manera simultanea.

Al usar una fibra con dispersión negativa las frecuencias altas en el inicio del bit se atrasarán dirigiéndose hacia el pulso, asimismo, las frecuencias bajas presentes en las transiciones de bajada se forzarán a ir hacia adelante en dirección al pulso; por dicha razón, el pulso se comprimirá en cierta medida y la razón de extinción aumentará debido a que la potencia del pulso se concentra más. Dicho comportamiento permite que se abarquen distancias más grandes sin que los problemas derivados de la dispersión hagan mella en la calidad de la señal.

Para el caso de un pulso con *chirp* adiabático; éste consiste en un cambio de frecuencia respecto al nivel de potencia, los bits en '1' tendrán una frecuencia mayor que los bits en '0', efecto conocido como *blue-shifted*. Debido a este aumento de frecuencia, cuando se propagan pulsos con este *chirp* en una fibra de dispersión positiva, el resultado es en un pico de intensidad mayor al frente del pulso y en la parte final una transición lenta. Cuando la fibra por la que se propaga la señal tiene dispersión negativa, el efecto es exactamente el contrario y el pico aparece en la parte final del pulso. Este tipo de *chirp* no presenta una interacción con la dispersión que mejore la calidad de la señal como pasa con el *chirp* transitorio, la única diferencia entre usar una fibra G.652 (D=17) o G.655 (D=-5.7) estriba en que la G.655 logrará un mejor desempeño debido a que la magnitud de su dispersión es menor que la de la fibra G.652 [43].

El esquema 5.6 muestra los efectos descritos anteriormente de la interacción de un pulso óptico con *chirp* al propagarse en las fibras ópticas G.652 y G.655. Los esquemas (a) y (c) muestran los efectos de la dispersión en la línea punteada sobre un pulso con *chirp* transitorio para una fibra G.652 y G.655 respectivamente, mientras que las figuras (b) y (d) corresponden a los efectos sobre un pulso con *chirp* adiabático.

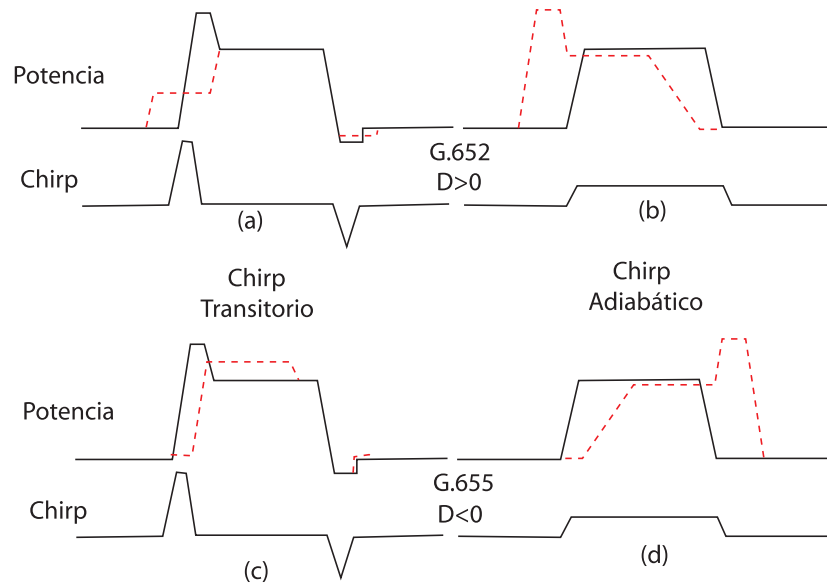


Figura 5.6: Efectos de la interacción de la dispersión para pulsos con diferente tipo de *chirp*, para una fibra G.652 (superior) y G.655 (inferior)

5.1.4. Factor Q

En los sistemas de comunicaciones es necesario analizar el comportamiento de los enlaces de transmisión. Muchos de los parámetros que se miden a menudo son: el *bit error rate*, el *jitter*, la relación señal a ruido y los niveles de potencia en los extremos transmisor y receptor del sistema.

Para poder obtener los valores de los parámetros antes dichos, resulta difícil predecirlos analíticamente, para estos casos se hace necesario realizar mediciones sobre los resultados al final de la transmisión. Todas estas características se reúnen en un patrón conocido como diagrama de ojo. En el Apéndice C se anexa una explicación más detallada de este diagrama.

El parámetro que se eligió para medir la calidad de la señal es el factor de calidad Q, dicha elección se tomó porque resulta posible obtener el valor del BER de una forma sencilla aunado a que al ser expresado en [dB] facilita visualizar la calidad del enlace a medida que se va propagando por la fibra óptica.

Este factor es una medida directa de la cantidad de información recibida correctamente. En los enlaces digitales, resulta común saber la tasa de bits en error (*BER*); entre más bajo el *BER*, más alta será la calidad de los datos a la salida del sistema. La relación entre el *BER* y el factor Q queda representada en la ecuación 5.5 [49].

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (5.5)$$

Donde ERF es la función de error, la cual se encuentra en tablas en algunos libros o se calcula mediante calculadoras o programas especializados para problemas de ingeniería. Sin embargo, en nuestro estudio, el factor Q será evaluado por medio de la ecuación 5.6 que es resultado de un procedimiento matemático tomando en cuenta las probabilidades de mediciones correctas en términos de los valores de las medias (I_1 e I_0) y las desviaciones estándar de las dos distribuciones existentes (σ_1 y σ_0).

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (5.6)$$

La figura 5.7 muestra la distribución de potencia de los bits en el detector. El parámetro Q se obtiene al analizar la probabilidad de error en un punto de muestreo. Si consideramos en (b) que la distribución de valores en que se presentan los bits en '1' y '0' es Gaussiana, I_1 e I_0 son los valores de las medias para los niveles alto y bajo respectivamente y se denotan con las líneas punteadas; σ_1 y σ_0 son los valores de la desviación estándar de las distribuciones de los niveles alto y bajo respectivamente. La región sombreada representa la probabilidad de identificación incorrecta e I_u es el nivel de potencia que indica el mínimo valor de error de medición y donde preferiblemente se debe realizar la medición.

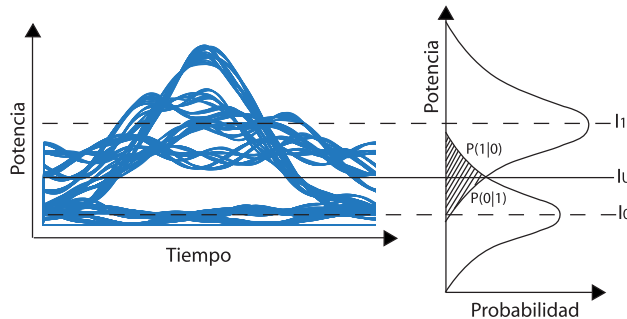


Figura 5.7: (a) Diagrama de ojo y (b) Distribución Gaussiana de potencia para los bits en 1 y 0

Para evaluar el significado del valor de Q , éste se expresa en decibeles y se toma en cuenta que valores superiores a 9 [dB] implican un desempeño excelente, valores entre 8 y 6 [dB] corresponden a un buenos resultados, pero valores menores a 6 [dB] son malos. Un valor muy utilizado para un sistema de comunicaciones ópticas es el de $Q = 6$ que corresponde a un $BER = 1 * 10^{-9}$, pero para nuestro estudio se eligió como umbral para observar el desempeño del sistema un valor de $Q = 7[dB]$ correspondiente a un $BER \approx 1 * 10^{-12}$. Este umbral en

la calidad del sistema ya se está aplicando en los nuevos estándares de sistemas ópticos como el caso del estándar 802.3ba de Ethernet a 100 Gb/s. Dicha elección es debida a que los sistemas ópticos exigentes de hoy en día trabajan con un BER de esa magnitud o inferiores. La figura 5.8 representa la graficación de la ecuación 5.5 donde se observa el BER aproximado para cada valor de Q .

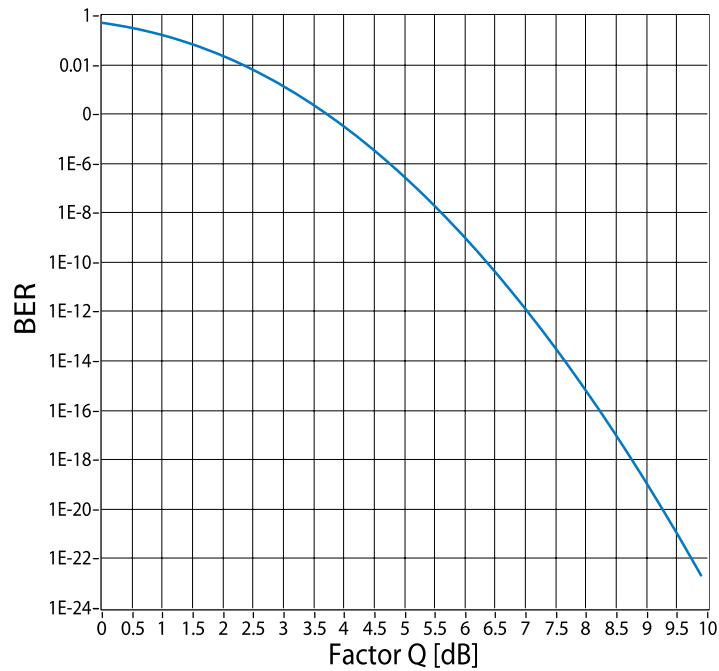


Figura 5.8: Bit Error Rate vs Factor Q

Es necesario indicar que el módulo que realiza el cálculo del factor Q en nuestra implementación obtiene el valor de Q en el punto de muestreo, por lo que si cambiamos el tiempo en que realiza la medición en el pulso, su valor cambiaría. Dicho comportamiento contrae un problema que se debe tomar en cuenta ya que una pequeña variación en la ubicación en el tiempo de muestreo en un pulso con muchas oscilaciones en el pulso ocasionaría una alteración del valor de la Q . En nuestros resultados, en el caso de los pulsos que presentaban oscilaciones y estas se iban desplazando a lo largo del pulso, dichas oscilaciones fueron las que provocaron que las gráficas del factor Q presentaran algunos cambios bruscos en su comportamiento.

5.2. Esquema del sistema

Para los estudios sobre la interacción del *chirp* con el tipo de fibra, fue necesario conectar el módulo del láser que se desarrolló con otros módulos correspondientes a una fibra óptica y un generador de diagramas de ojo. El esquema de los diferentes componentes conectados se muestra en la figura 5.9. Nuevamente, la modularidad que ofrece el trabajar mediante un lenguaje de programación gráfico, nos permite la construcción del sistema mediante 'conexiones' entre los diferentes elementos, tal y como se realizaría en una maqueta experimental. Este esquema, por tanto, no requiere mayor explicación.

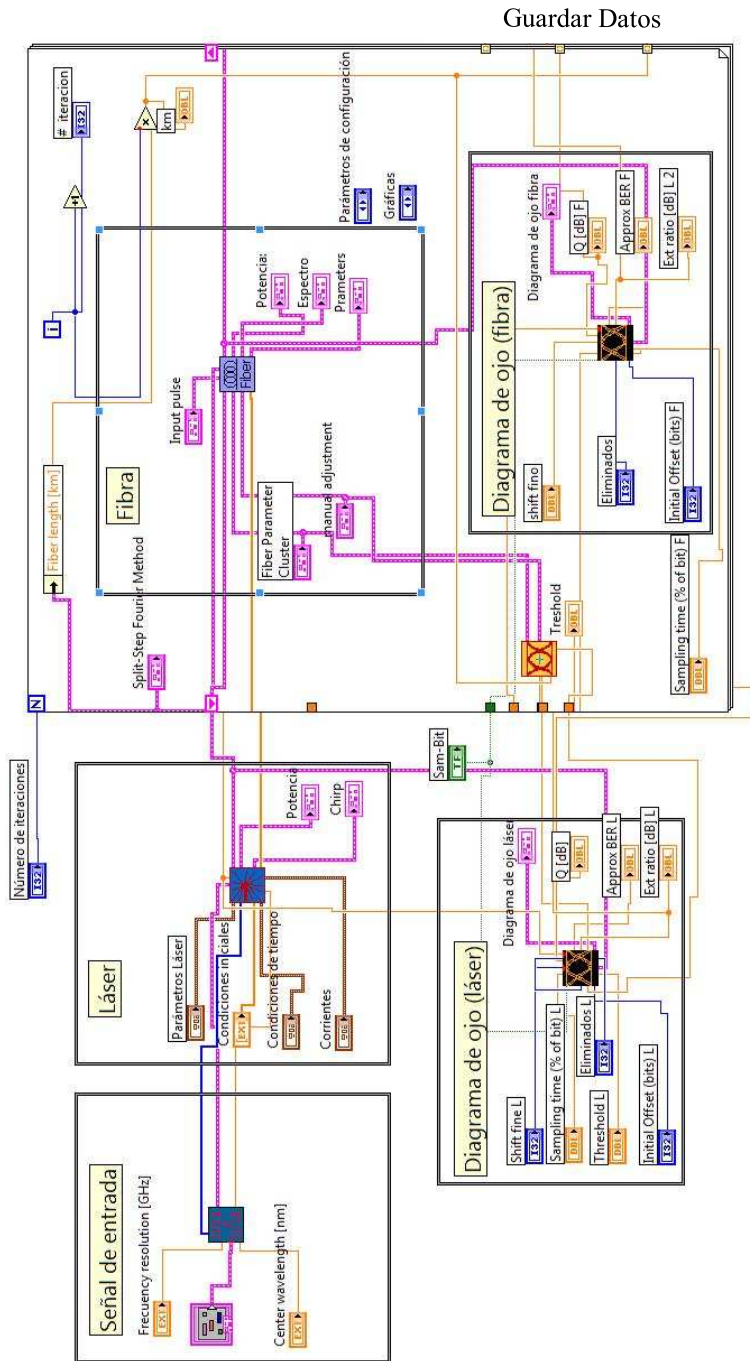


Figura 5.9: Esquema del sistema óptico a estudiar

5.3. Análisis de la propagación de pulsos ópticos con *chirp*

Después de haber concluido la implementación y validación de un láser de semiconductor y haber estudiado el fenómeno del *chirp* en un láser modulado directamente, pasamos a presentar un análisis numérico que nos permita encontrar la mejor combinación de láser y fibra óptica a fin de obtener un sistema óptico que presente el mejor desempeño. Este tipo de estudios es de vital importancia para los fabricantes de láseres de semiconductor con aplicaciones en telecomunicaciones debido a que les presenta directrices de diseño de los dispositivos a manufacturar. La manera de registrar el comportamiento de la calidad de la señal originada con un láser modulado directamente a través de una fibra óptica consistió en elegir una fibra óptica de longitud fija y dividirla en varias secciones, en cada una de las cuales se midió el factor de calidad en el diagrama de ojo; el punto de medición de este factor de calidad quedó fijo. Los láseres estudiados son los que se determinaron en la sección 4.4. Para los láseres LMD-1 (*chirp* adiabático a 2.5 Gbps), LMD-2 (*chirp* transitorio a 2.5 Gbps) y LMD-4 (*chirp* equilibrado a 2.5 Gbps) se hicieron las mediciones en secciones de 50 [km] hasta alcanzar una distancia máxima de 1000 [km]; en el caso del láser LMD-3 (*chirp* mixto a 10 Gbps), como su velocidad de transmisión es 4 veces mayor que los láseres anteriores y los efectos dispersivos lo afectan en mayor medida, las mediciones se hicieron en secciones de 25 [km] y la distancia máxima fue de 500 [km]. Las fibras estudiadas, como se mencionó en la sección 5.1.1 son: la G.655 y G.652, las cuales se representaran con los colores rojo y azul respectivamente.

Aparte de la gráfica del factor Q , se anexaron varios diagramas de ojo a diferentes distancias: a la salida del láser (0 [km]), la distancia donde se cruce el umbral de $Q = 7[dB]$ para la fibra G.652, y la distancia en que se rebase el mismo umbral para la fibra G.655. En el caso del láser LMD-3 el umbral se ubicó en $Q = 4,5[dB]$ debido que el umbral de los $7[dB]$ era cruzado a una distancia muy pequeña. A continuación se presentan los resultados para los diversos láseres.

5.3.1. Desempeño del láser LMD-1

Para medir la evolución de la calidad de la señal obtenida por el láser LMD-1 que presenta un *chirp* adiabático, a través de las dos diferentes fibras ópticas en estudio, se eligió situar el punto de muestreo a 50% del periodo del bit y la potencia media entre los niveles alto y bajo. La figura 5.10 muestra en la línea roja el comportamiento en la fibra G.655 de dispersión negativa y en azul la fibra G.652 con dispersión positiva. Se señaló como umbral el valor de $Q = 7[dB]$.

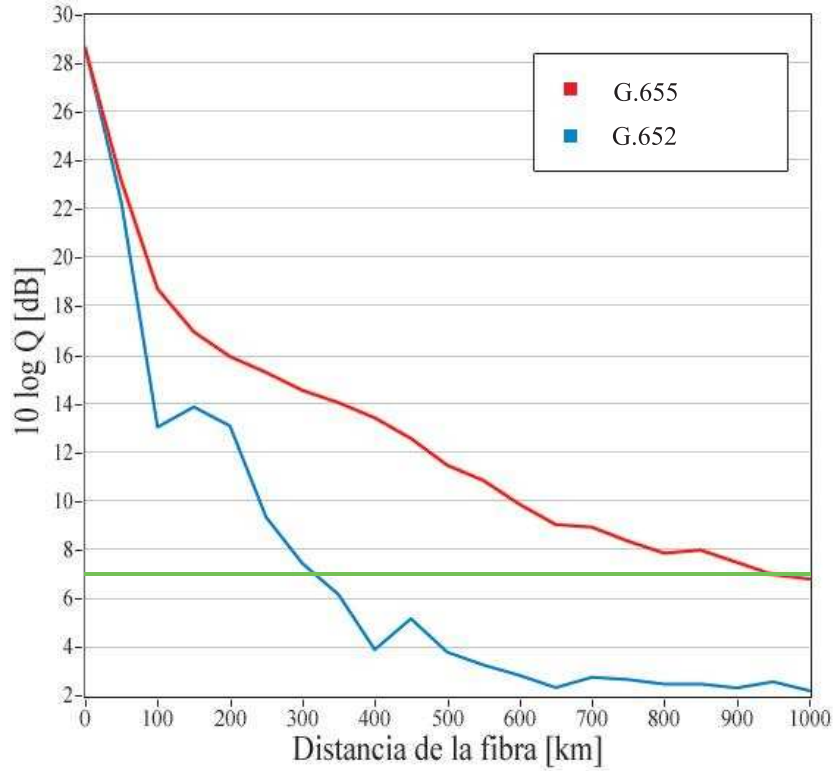


Figura 5.10: Comportamiento del factor Q del láser LMD-1 operando a 2.5 Gbps

Como era de esperarse, el desempeño en una fibra de dispersión negativa resultó mejor. En el caso de la fibra G.652, el factor Q pasa por el umbral superando los 300 [km], un valor bastante alto; por otro lado, el valor de distancia en que se cruza el umbral para la fibra G.655 es aproximadamente los 950 [km], más de tres veces el valor del alcance con la fibra G.652. El que se haya presentado un mejor desempeño para la G.655 se debe a que la magnitud de su dispersión es menor que en la G.652; si la magnitud, no importando el signo, fuera igual, los efectos por dispersión serían muy similares solo cambiando la dirección en que se presenta la abultación de potencia en el pulso, a la izquierda para la G.652 y a la derecha para la G.655.

Los diagramas de ojo de la figura 5.11 muestran el comparativo de la señal al propagarse en los diferentes tipos de fibra óptica y a diferentes distancias; estas se determinaron por los puntos donde la calidad de la señal cruzaba el umbral de $Q = 7[dB]$. Los esquemas son: (a) para el valor del diagrama obtenido a 0 [km], (b) y (c) es la señal que se propagó por la fibra G.655 a 300 [km] y 950 [km] respectivamente y (d) y (e) son los diagramas de la señal que se propagó por la fibra G.652 a 300[km] y 950 [km] respectivamente. Como era de preverse,

5.3. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE PULSOS ÓPTICOS CON CHIRP115

los diagramas de ojo en la fibra G.652 presentan un pico del lado izquierdo a causa de la interacción de la dispersión con el *chirp* adiabático; mientras que en la fibra de dispersión negativa se muestra el abultamiento en el lado derecho.

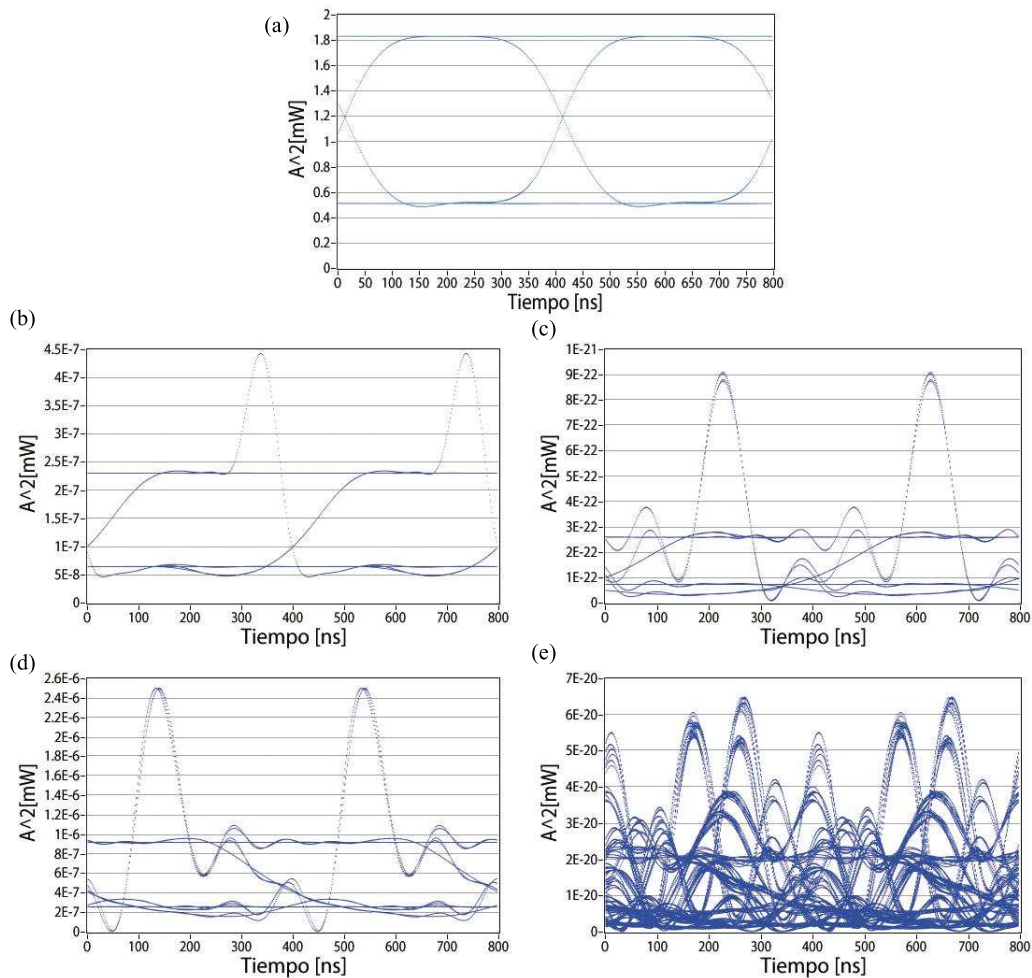


Figura 5.11: Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-1: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.655 300 [km] (b) y 950 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.652 300[km] (d) y 950[km] (e)

Como se mencionó en la sección 5.1.1, el desempeño del *chirp* adiabático no se ve mejorado por el signo de la dispersión, sino por la magnitud de ésta. Para

corroborarlo, se comparó los diagramas de ojo para la señal con la fibra G.652 y otra con los mismos parámetros que dicha fibra, pero con el signo de la dispersión contrario. La distancia de la fibra fue fijada en 300 [km]. Los diagramas de ojo de la figura 5.12 muestran cómo al modificar el signo de la dispersión siendo esta $|D| = 17$, los resultados para una señal con *chirp* adiabático, son muy similares; aunque la dispersión con valor negativo (b) tiene un peor desempeño que el diagrama correspondiente a la dispersión positiva (a), dicho resultado es provocado por el *chirp* transitorio existente en la señal.

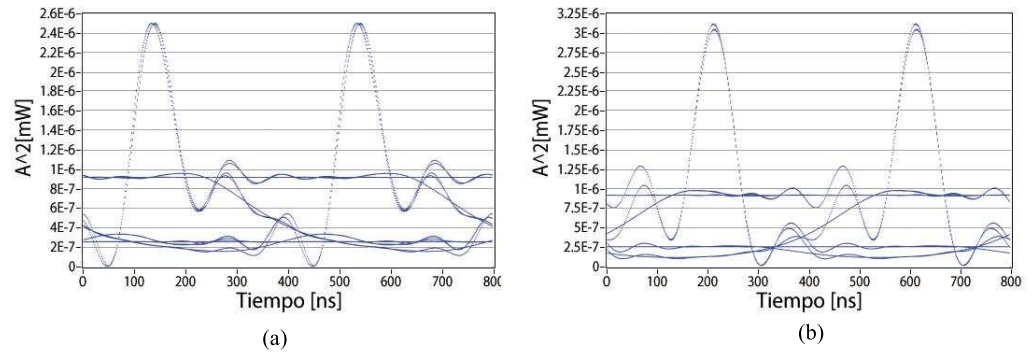


Figura 5.12: Comparativa del efecto de la magnitud de la dispersión en una señal con *chirp* adiabático con el valor $D = 17$ (a) y $D = -17$ (b)

5.3.2. Desempeño del láser LMD-2

El siguiente láser a analizar fue el LMD-2, el cual consiste en un láser con *chirp* transitorio predominante a un *bit rate* de 2,5[Gbps]. De igual manera, observamos en la gráfica 5.13 el factor Q de la fibra G.655 en rojo y la G.652 en azul, el umbral lo ubicamos en el mismo valor de $Q = 7$.

5.3. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE PULSOS ÓPTICOS CON CHIRP117

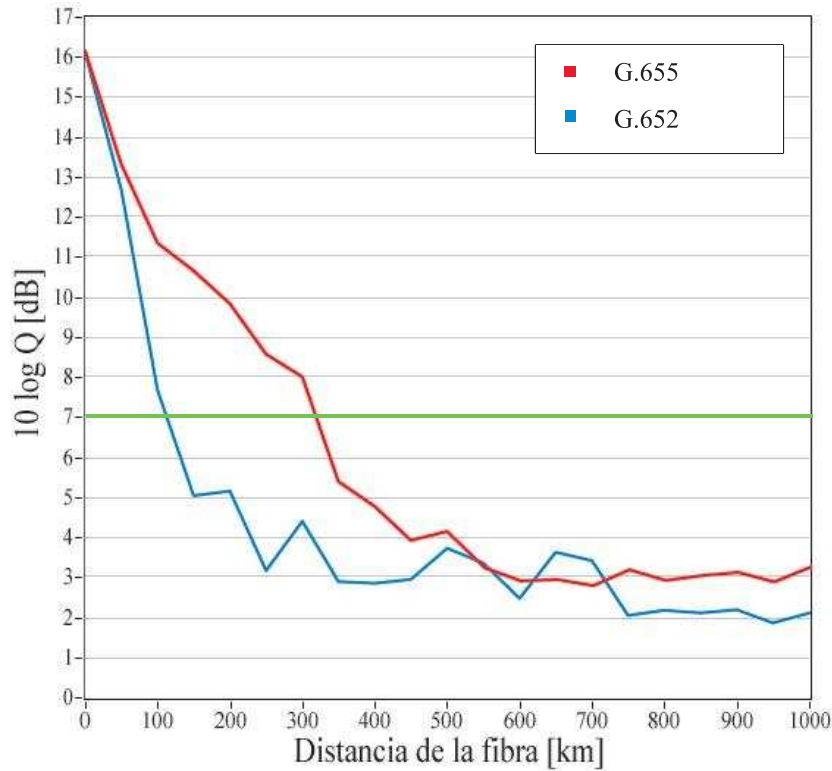


Figura 5.13: Comportamiento del factor Q del láser LMD-2 operando a 2.5 Gbps

Para este láser, observamos que la distancia en la que cruza el umbral de los 7 [dB] es de aproximadamente 100 [km] para la fibra G.652 y de 300 [km] para la fibra G.655. De acuerdo con el estudio presentado en la sección 5.1.3 las oscilaciones en las transiciones de los pulsos se deben integrar al pulso ocasionando una compresión de éste; para observar este efecto se hace necesario visualizar los diagramas de ojo. La figura 5.14 muestra los diagramas a diferentes distancias: (a) es la señal producida por el láser (0[km]), (b) y (c) son los esquemas de la transmisión de la señal por la fibra G.652 a 100 y 300 [km] respectivamente y (d) y (e) son los resultados al transmitir la señal por 100 y 300 [km] de fibra óptica, pero en este caso de fibra G.655. Como se puede observar, en el caso de la propagación por una fibra G.652, el pulso empieza a perder su forma cuadrada al expandirse ocasionando interferencia intersimbólica. Este fenómeno se debe a que las componentes espectrales al inicio del pulso tienen una frecuencia más alta y por efecto de la dispersión, avanzan más rápido que lo que avanza la mayor parte del pulso expandiendo este y provocando interferencia intersimbólica; pasa un efecto similar en la parte final del pulso, pero en este caso por un retraso de la parte final del pulso a causa de que esta

sección se compone de componentes de menor frecuencia que la del pulso en general. Dicho fenómeno cumple con lo que se predijo en la sección 5.1.3. En el esquema (c) los efectos de la dispersión son tan grandes que la calidad de la señal desciende hasta un valor de $Q = 3$. Respecto a la propagación en la fibra de dispersión negativa, se puede observar que el efecto más visible es que el pulso se comprime, aunado a que el *jitter* de la señal prácticamente no se ha deteriorado. Observamos la gráfica (d) que representa la señal después de 100 [km] de fibra óptica, el cruce por transiciones se encuentra casi en el nivel bajo de potencia y aunque las oscilaciones han aumentado, la distinción entre los bits es muy marcada. A los 300 [km] (e), las transiciones no se cruzan en ningún punto, reduciendo la duración del pulso a aproximadamente un 70% del tiempo original. Aunque las gráficas (c) y (e) tienen el mismo valor del factor Q , resulta fácil deducir que la señal que se propagó por una fibra con dispersión negativa tienen mucho mejor calidad; el bajo nivel de la Q que se presenta con la fibra G.655 es ocasionado a que las oscilaciones en la parte alta del pulso son de gran magnitud y matemáticamente, la desviación estándar de la distribución Gaussiana que representa la parte alta del diagrama es muy grande y la región de probabilidad de recepción errónea se dispara, resultando en un valor bajo de Q .

Para corroborar que la señal se ve beneficiada al usar una señal con *chirp* transitorio y que no se debe a que la magnitud de la dispersión es menor para el caso de la fibra G.655 como ocurre con la presencia de *chirp* adiabático; se hizo una prueba similar a la del láser LMD-1. Se hizo propagar la señal producida por el láser LMD-2 por 100 [km] de la fibra G.652 y la misma distancia por otra fibra con los mismos parámetros que la fibra anterior, pero con el signo de la dispersión negativo. Los resultados se observan en la figura 5.15.

5.3. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE PULSOS ÓPTICOS CON CHIRP119

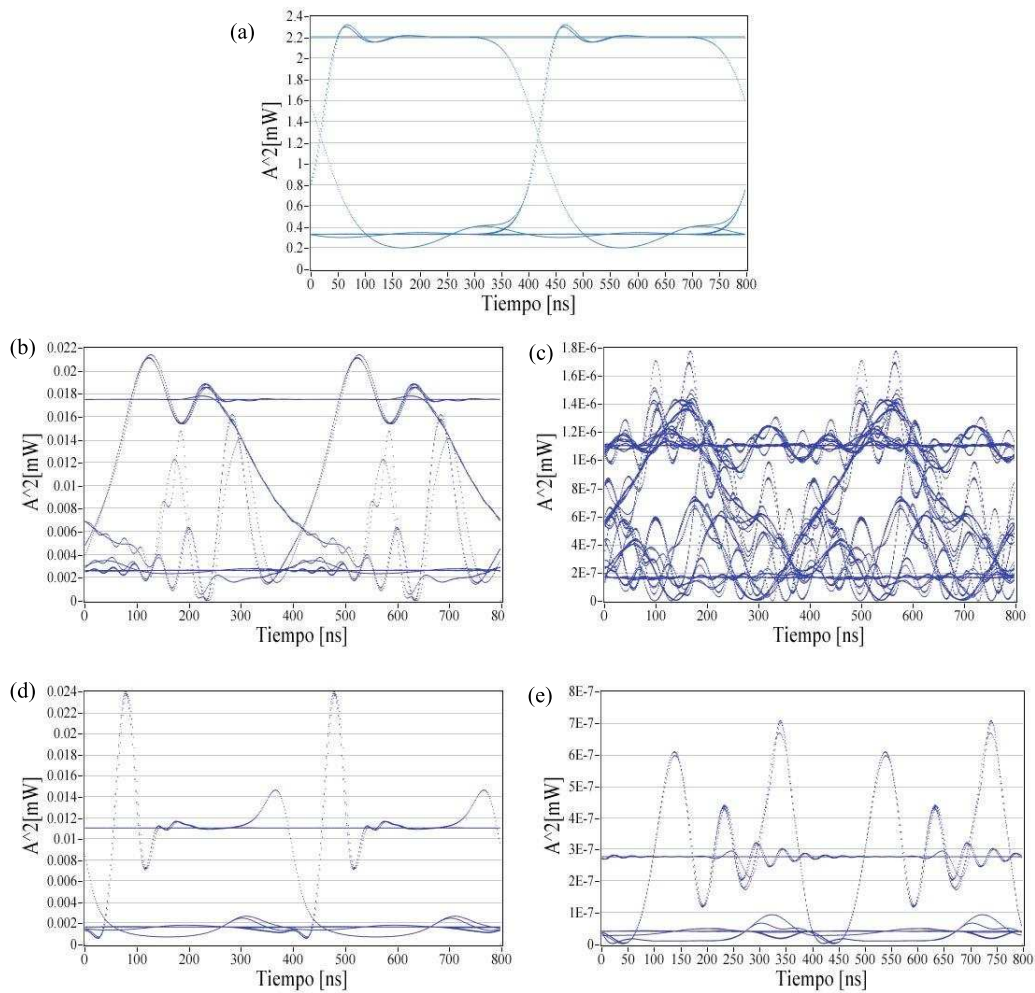


Figura 5.14: Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-2: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.652 100 [km] (b) y 300 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.655 100[km] (d) y 300[km] (e)

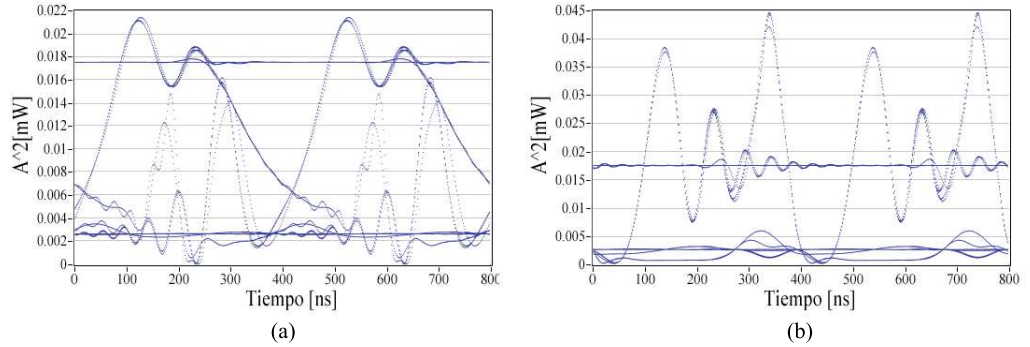


Figura 5.15: Comparativa del efecto del signo de la dispersión en una señal con *chirp* transitorio con el valor $D = 17$ (a) y $D = -17$ (b)

El factor Q es: $Q = 7,02$ para (a) y $Q = 7,95$ para (b) donde se observa una mejor calidad en el caso de una fibra con dispersión negativa. Al contrario que en el caso de una señal con *chirp* adiabático donde el efecto causado por una fibra con dispersión negativa y otra positiva consiste en que el efecto se presentaba en forma igual, pero de lado contrario; la señal con *chirp* transitorio se comporta diferente para cada tipo de dispersión. En el caso de la dispersión positiva (a), se observan componentes que salen del pulso e invadiendo el tiempo de ranura de otros bits ocasionando interferencia intersimbólica. En contraparte, el diagrama de ojo de la fibra con dispersión negativa no presenta componentes adicionales en la parte baja del diagrama; sin embargo, hay oscilaciones que se desplazan de la orilla del pulso a todo lo ancho de éste ocasionando una disminución drástica del factor Q . El ancho del pulso se disminuye en el caso de dispersión negativa, efecto contrario que en dispersión positiva. Sobre la forma cuadrada del pulso, con dispersión negativa, ésta no se pierde y los trazos del diagrama son muy finos significando un *jitter* muy pequeño, contrariamente en el caso de la dispersión positiva donde las líneas son más anchas, lo que indica un *jitter* mayor y que la señal se distorsiona más.

Es importante resaltar que aunque la distancia máxima lograda con un láser con *chirp* transitorio y una fibra de dispersión negativa es menor que un láser de *chirp* adiabático con una fibra de las mismas características, al observar los diagramas de ojo podemos vislumbrar que la transmisión de una señal con *chirp* transitorio mejora varias de las características de la señal entre las cuales se pueden enumerar el ancho del ojo, un valor pequeño de jitter, el mantener la forma cuadrada de la señal aún después de grandes distancias de transmisión, entre otras. Sobre la manera de mejorar el valor de la Q , es necesario reducir la magnitud de las oscilaciones en el pulso; varias de las posibles soluciones pueden ser el usar un filtro con un perfil gaussiano más suave y el tratar de reducir la diferencia entre los valores de las corrientes para un bit en '0' y un bit en '1'. Estas dos últimas acciones mejorarán el desempeño del sistema logrando

5.3. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE PULSOS ÓPTICOS CON CHIRP121

alcanzar distancias de transmisión con un buen valor de Q mucho mayores que las obtenidas en este trabajo. Es importante mencionar que el factor Q sólo es un auxiliar para estimar el desempeño de un sistema, principalmente en campo, pero la manera definitiva de evaluar el desempeño de un sistema es mediante el uso de un *Bit Error Rate Tester*. La implantación de un sistema tal esta fuera de los alcances de este tesis.

5.3.3. Desempeño del láser LMD-3

De igual manera que en los láseres LMD-1 y LMD-2: se graficó para el láser LMD-3 de chirp mixto a 10 Gbps, el factor Q respecto a la distancia de propagación en fibras ópticas con dispersión positiva y negativa. La gráfica 5.16 muestra el comportamiento del factor Q.

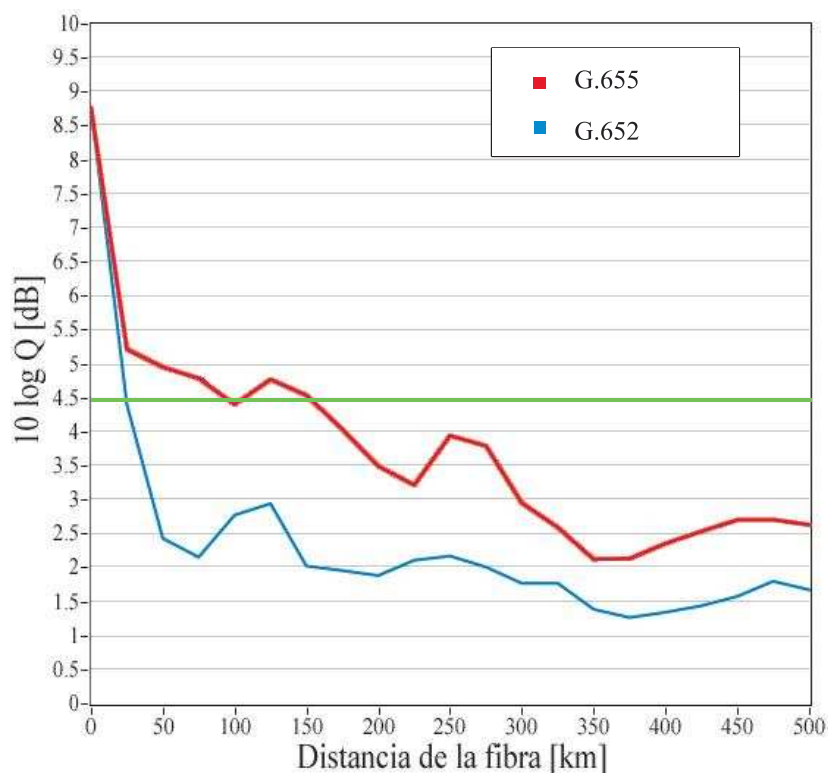


Figura 5.16: Comportamiento del factor Q del láser LMD-3 operando a 10 Gbps

En este caso, el láser funciona a 10 [Gbps] por lo que el efecto de la dispersión se presenta en una magnitud mayor debido a que los pulsos duran menos. Para este láser, el umbral lo colocamos en 4.5 [dB], una calidad muy baja, pero

sólo con fines de comparación al usar las fibras G.652 y G.655. Los resultados fueron los siguientes: una distancia de aproximadamente 25 [km] para la fibra G.652 y de 140 [km] para una fibra G.655. La gran diferencia radica en que en la fibra de dispersión positiva, el efecto de dispersión ensancha el pulso muy rápido ocasionando que la interferencia intersimbólica sea grande desde los primeros kilómetros de propagación. En el caso de una transmisión por la fibra con dispersión negativa, los cambios de frecuencia ocasionados por el *chirp* transitorio provocan que el pulso se comprima hasta los 90 [km], y después empieza a dispersarse lo que le permite una mayor distancia de propagación sin que se presenten componentes de gran magnitud que provoquen interferencia intersimbólica.

5.3. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE PULSOS ÓPTICOS CON CHIRP123

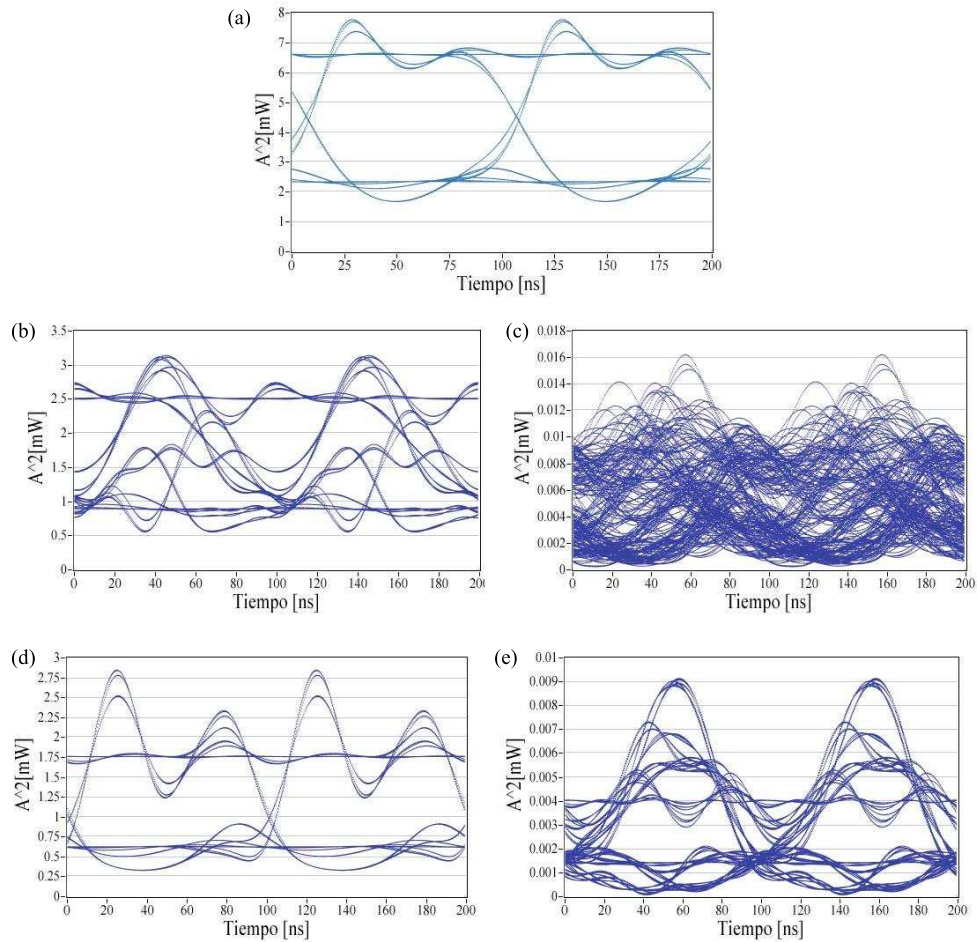


Figura 5.17: Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-3: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.652 25 [km] (b) y 140 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.655 25[km] (d) y 140[km] (e)

Los diagramas de ojo para las distancias en que cruzan el umbral el factor Q del láser LMD-3 se muestran en la figura 5.17.

La figura 5.17 (a) muestra el diagrama de ojo de la señal obtenida del láser, esta señal contiene una gran presencia de *chirp* transitorio como se mencionó en el capítulo 4; (b) y (c) son los diagramas a 25 y 140 [km] de propagación por fibra de dispersión positiva respectivamente. La interacción del *chirp* transitorio con la dispersión positiva causa que el pulso se ensanche y que las partes de alta frecuencia que se encuentran al inicio de los pulsos se adelanten y las de baja

frecuencia de la parte final de los pulsos se atrasan creando interferencia; a 25 [km] la señal contiene una gran interferencia intersimbólica por las componentes mencionadas ocasionando que la Q baje de forma muy abrupta y a 140 [km] la señal se ha distorsionado completamente y ya no se puede ubicar los pulsos en el diagrama. Sobre las figuras (d) y (e) corresponden a la propagación por una fibra de dispersión negativa con 25 y 140 [km] de distancia respectivamente; a 25 [km] la señal conserva muy bien su forma y se comprime un poco en relación a la figura (a) debido a la interacción del *chirp* transitorio con el tipo de dispersión, las oscilaciones en la parte superior del pulso son las que bajan el valor del factor Q . Dichas oscilaciones pueden ser reducidas por medio del filtro pasa-bajas que se encuentra después del proceso de detección (y que aquí no hemos simulado). A los 140 [km] se puede observar que los pulsos están bien definidos, hecho contrario al diagrama (c). La interacción entre el *chirp* y la dispersión ocasiona que las oscilaciones que se produjeron en la parte alta del pulso se acoplen en los 140 [km] aproximadamente, por eso en este diagrama se observa que la abertura del ojo es grande. Después de esta distancia las oscilaciones salen de sincronía y vuelven a crear interferencia intersimbólica disminuyendo el valor de la Q .

5.3.4. Desempeño del láser LMD-4

El láser LMD-4 presenta los dos tipos de *chirp* sin que alguno predomine sobre otro, su *bit rate* es de 2.5 Gbps. La evolución del factor Q respecto a la propagación en cada una de las fibras estudiadas se presenta en la gráfica 5.18. Igual que en los demás láseres, la fibra G.655 presenta un mejor desempeño, en este caso la distancia máxima arriba del umbral para la fibra G.652 fue de 100 [km], mientras que para la fibra G.655 alcanzó una distancia tres veces mayor acercándose a los 350 [km].

5.3. ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE PULSOS ÓPTICOS CON CHIRP125

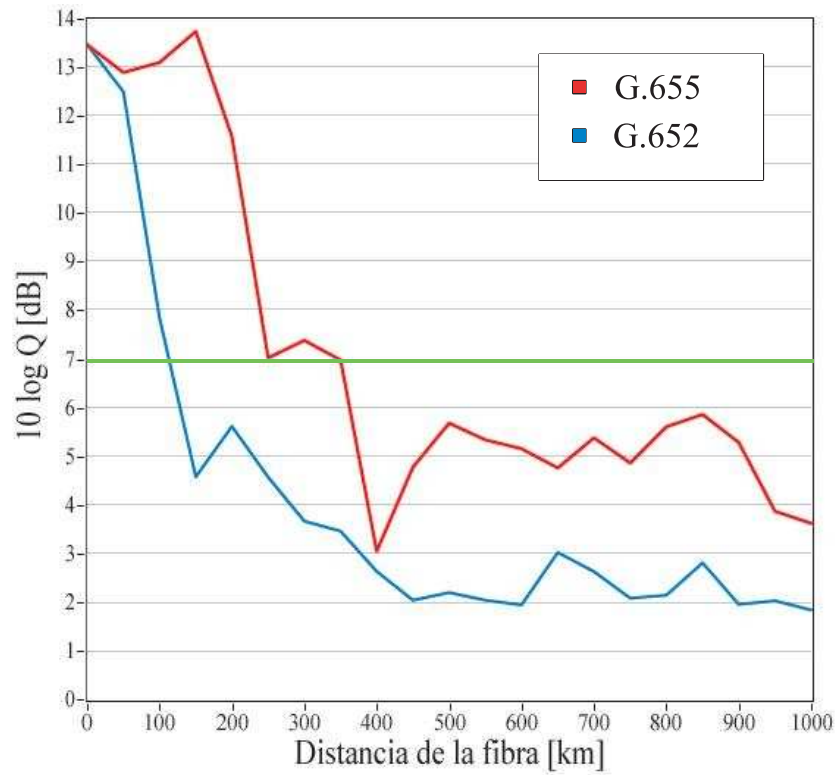


Figura 5.18: Comportamiento del factor Q del láser LMD-4 operando 2.5 Gbps

Para un análisis más detallado observamos los diagramas de ojo de la figura 5.19.

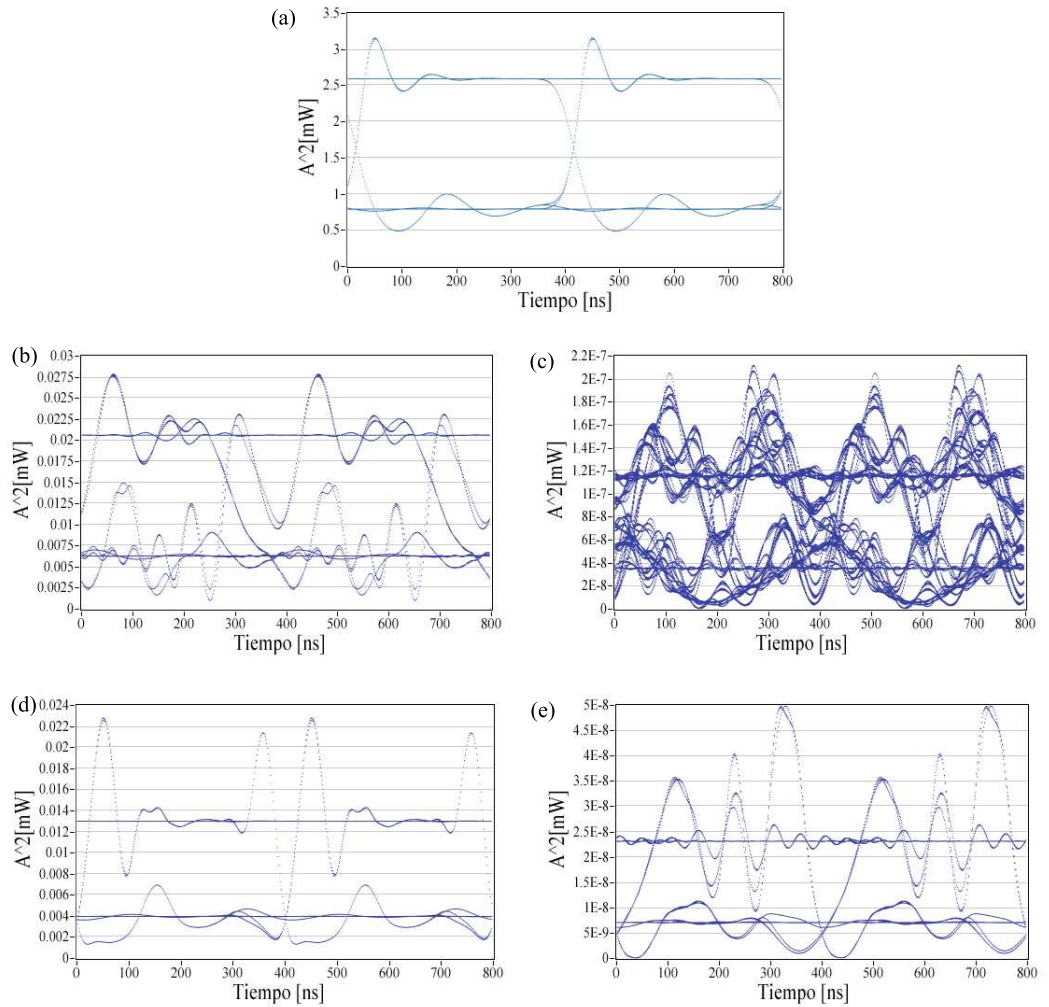


Figura 5.19: Diagramas de ojo para la señal del láser LMD-4: a la salida del láser (a), al propagarse por una fibra G.652 100 [km] (b) y 350 [km] (c); y al propagarse por una fibra G.655 100[km] (d) y 350[km] (e)

La señal producida por este láser presenta una gran presencia de *chirp* transitorio. En la figura 5.19 se muestran los diagramas de ojo para la señal del láser donde: (a) muestra la señal obtenida a la salida del láser, (b) y (c) muestra los diagramas de ojo de la señal después de transmitirse por una fibra óptica G.652 de 100 [km] y 350 [km], respectivamente; y (d) y (e) muestran igualmente los diagramas a 100 [km] y 350 [km], respectivamente, pero ahora pasando la

señal por una fibra G.655. Al transmitirse los pulsos por la fibra G.652, el pulso comienza a tener una protuberancia en la parte delantera, además de un aumento del tiempo de bajada; dichos fenómenos son producidos por la presencia del *chirp* adiabático en la señal. El efecto producido por el chirp transitorio es que la señal se hace más ancha de forma muy acelerada y produce una mayor interferencia intersimbólica. A 100 [km] de transmisión, aunque los efectos son muy visibles, los pulsos aún están definidos, pero la protuberancia al inicio del pulso es mayor a la presente en la señal recién salida del láser; a los 350 [km] la señal está demasiado distorsionada, se presenta un *jitter* grande y la ubicación del pulso no alcanza a definirse con claridad porque se ha dividido en dos partes: una es la componente del pulso que tenía una frecuencia superior ocasionada por el *chirp* transitorio; y la otra corresponde a la protuberancia que creció en mayor medida del lado izquierdo debido a que se adelantaron las componentes del pulso a causa del *chirp* adiabático. La presencia de estos dos fenómenos ocasiona que el pulso pierda su forma. En el caso de la transmisión por 100 [km] de fibra G.655, observamos una compresión del pulso por la interacción del *chirp* transitorio con la dispersión; el *chirp* adiabático se refleja en que en la parte final del pulso se forma un abultamiento de mayor intensidad que la producida para el láser LMD-2, aunado a que en la parte baja del pulso hay oscilaciones de mayor magnitud que si se tratara de un pulso con *chirp* transitorio solamente. A los 350 [km] el *chirp* adiabático juega un papel más protagónico, la parte final del pulso presenta una oscilación de mucha mayor magnitud que las demás, el tiempo de ranura es menor que la señal original, pero el tiempo de subida es mayor que el de bajada; también existe un mayor *jitter*, efecto que prácticamente no aumentó en el láser LMD-2 y por lo tanto se lo podemos adjudicar al *chirp* adiabático. La calidad de la señal se vio seriamente afectada por la presencia de las oscilaciones que se presentaron en la señal del láser.

5.4. Resultados

Con las simulaciones del láser LMD-4 damos por terminado el análisis de resultados y procedemos a hacer un conjunto de conclusiones sobre el comportamiento entre la señal de un láser modulado directamente y la dispersión de la fibra óptica:

- Se observó que en todos los casos analizados, la fibra que presentó mejor desempeño en términos de distancia de propagación fue la G.655. Este hecho se debió, para los láseres con *chirp* adiabático, por el bajo valor de $|D|$ de la fibra G.655 ($|D| = 5,7$) en comparación con la fibra G.652 ($|D| = 17$); y en el caso de los láseres con *chirp* transitorio, por la interacción entre el *chirp* y la dispersión de la fibra.
- Se concluyó que la ventaja de usar un láser con *chirp* transitorio y una fibra de dispersión negativa es que su interacción provoca que el pulso se comprima, lo que se debería traducir en una mayor distancia de propagación con una buena calidad en comparación de cuando se usa una fibra

de dispersión positiva. El problema que se genera, es que aunque el pulso se comprime, las oscilaciones que se presentan al inicio del pulso por la presencia del *chirp* transitorio se trasladan a lo largo del pulso ocasionando que estas oscilaciones provoquen una lectura errónea del valor del bit, esta es la razón por la que el factor Q disminuye al usar dicha configuración.

- Se observó que en el caso del láser LMD-3 (de *chirp* mixto y velocidad de transmisión de 10 Gbps), el problema de la degradación de la calidad de la señal a causa de la interacción de la dispersión de la fibra es cuatro veces más rápido por la mayor velocidad de transmisión; el mejor desempeño con la fibra óptica G.655 se debe a que la interacción del *chirp* transitorio presente en la señal del láser ocasiona que el pulso se comprima; dicho comportamiento otorga que el pulso tarde más en ensancharse y se pueda alcanzar una distancia mayor de transmisión que la obtenida con una fibra G.652. Se podría decir que en términos de distancia tuvo el mejor desempeño comparado con el resto de los láseres ya que alcanzó una distancia de más de cinco veces mayor que con la fibra G.652 para el mismo valor de Q, mientras los otros láseres era de tres veces aproximadamente.
- Después de analizar los resultados, el láser que presentó mejor desempeño en términos de distancia usando el factor Q como referencia, fue el láser con *chirp* adiabático al alcanzar casi los 1000 [km] de propagación con un buen factor de calidad (Q=7).
- El usar el factor Q como parámetro de medición de la calidad de la señal no nos proporciona la suficiente información de la calidad de la señal, por dicha razón fue necesario analizar los diagramas de ojo. A partir de los resultados obtenidos con estos diagramas observamos que aunque usar láseres con *chirp* adiabático obtenemos una mayor distancia de transmisión, la señal presenta el efecto de *jitter* de forma pronunciada ($\sim 2\%$), así como los pulsos pierden su forma cuadrada y se ensanchan. Este comportamiento no se observa en la transmisión con un *chirp* transitorio donde la señal se mantiene sin mucha distorsión a lo largo de toda la transmisión. A partir de esas observaciones podemos decir que si se logra aminorar las oscilaciones presentes en la señal de un láser transitorio, se puede aprovechar estas características de la señal y lograr una transmisión que supere por mucho la de un láser adiabático y tal vez, la de un láser con modulador externo.
- En el caso del láser LMD-4 que presenta un *chirp* equilibrado, su desempeño no es bueno, aunque pareciera que alcanza más distancia de propagación con la fibra G.655, la interacción de los dos tipos de *chirp* produce que la señal al terminar de propagarse presenta oscilaciones de mucha mayor amplitud que el láser LMD-2, y aunque en mucho menor medida que un láser con *chirp* adiabático, el *jitter* empieza a representar un problema en la calidad de la señal al superar el 1%. Debido a las razones mencionadas, se consideró que este tipo de láser no presenta un

buen desempeño y sus características no le confieren la posibilidad de alcanzar una mayor distancia de propagación que la obtenida usando alguna técnica especial.

