

*Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40Gbps a  
través de los Formatos de Modulación Avanzados  
DPSK y DQPSK*

*Anexo B*



Tesis de Maestría

**ING. GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO**

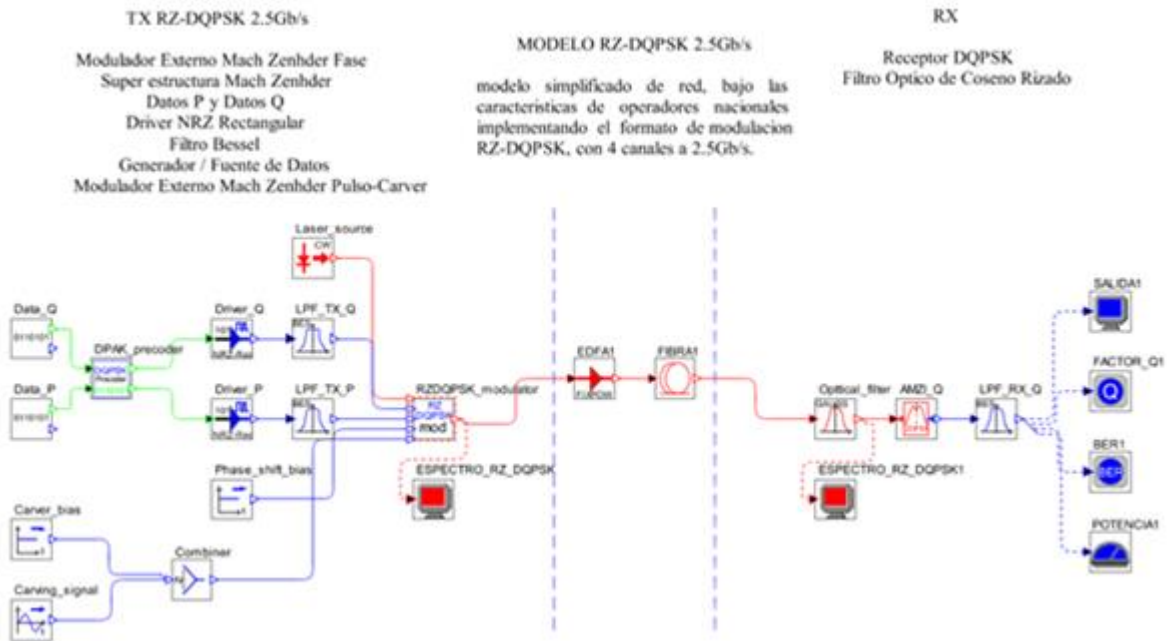
Director: PhD. Giovanni López Perafán

*Universidad del Cauca*

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones  
Popayán, 2019

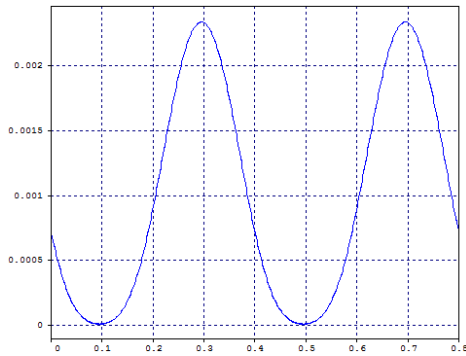
## ANEXO B

### INCIDENCIA DE LAS DEGRADACIONES ÓPTICAS CON EL FORMATO DE MODULACIÓN RZ-DQPSK

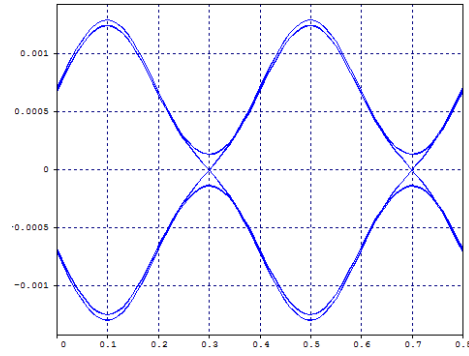


**Figura 1 Modelo simplificado de red para el formato de modulación RZ-DQPSK.**

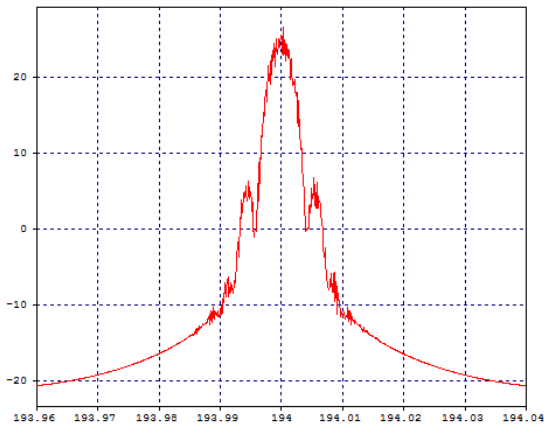
Como se observa en la figura 1, este formato de modulación, tiene la característica de ser muy complejo en la configuración física de los elementos en transmisión y recepción, dado que el formato requiere una estructura súper mach Zehnder para separar los datos de fase (datos P) y cuadratura (datos Q). En las figuras 2 (a) a 2 (d), se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación RZ-DQPSK, para su señal no modulada, el diagrama del ojo para los datos de fase y cuadratura y el espectro óptico de los canales propagados.



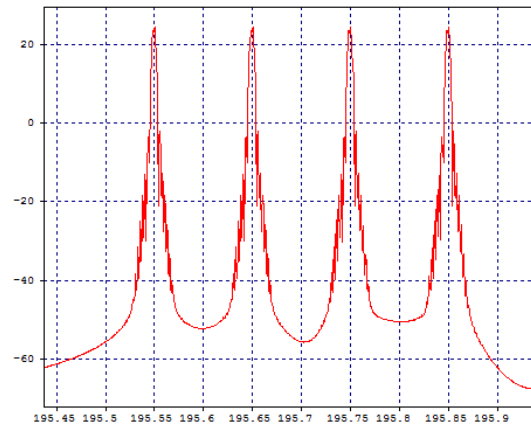
**Figura 2 (a) Salida no Modulada del Formato RZ-DQPSK.**



**Figura 2 (b) Salida Modulada del Formato RZ-DQPSK Back to Back.**



**Figura 2 (c) Espectro Óptico para un solo canal.**



**Figura 2 (d) Espectro Óptico para cuatro canales a 100GHz de espaciamiento.**

### ❖ Análisis de los efectos lineales: Ruido y Pérdidas

Para determinar el efecto de las pérdidas y el ruido asociadas a la propagación para un solo Span de 80Km, se analizan los parámetros de monitoreo óptico mediante la variación de la distancia debido a que la atenuación de la fibra y el ruido de los amplificadores EDFA son parámetros intrínsecos de cada uno de los elementos de red. Con el propósito de verificar la degradación del modelo debido solo a las pérdidas introducidas por la fibra y al ruido de los dispositivos, se trabaja con

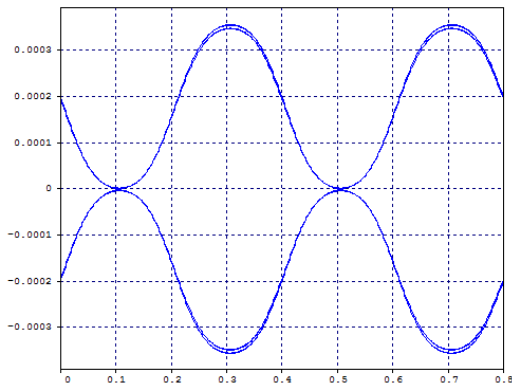
potencias mínimas de amplificación para estar dentro del rango del receptor de, con el fin de no excitar los efectos no lineales y se desprecia la dispersión cromática introducida por la fibra (17ps/nm\*Km), así mismo se desprecian los efectos del láser (FWHM) dado que este formato es susceptible a degradación debido al incremento del mismo. Al realizar la variación de la distancia y debido a que la fibra introduce 0.275dB/Km se genera un rango de atenuación desde 35.75dB para 130Km hasta 46.75dB para 170Km de pérdidas totales introducidas al modelo. Así mismo se tiene en cuenta el ruido introducido por los amplificadores EDFA del orden de los 5.5dB, el ruido de los moduladores y el de los dispositivos de compensación.

Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>TX</sub> [dBm]	OSNR <sub>IN</sub> [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
130	195.9	1e-40	39.99	-0.04	71.22	-35.83	36.78
135	195.9	1e-40	39.55	-0.04	71.22	-37.18	38.22
140	195.9	1e-40	39.53	-0.04	71.22	-38.54	35.34
145	195.9	1e-40	39.41	-0.04	71.22	-39.90	39.72
150	195.9	1e-40	39.40	-0.04	71.22	-41.27	39.68
155	195.9	1e-40	39.36	-0.04	71.22	-42.65	37.43
160	195.9	1e-40	39.34	-0.04	71.22	-44.02	40.56
165	195.9	1e-40	39.28	-0.04	71.22	-45.41	38.19
170	195.9	1e-40	39.20	-0.04	71.22	-46.81	35.95

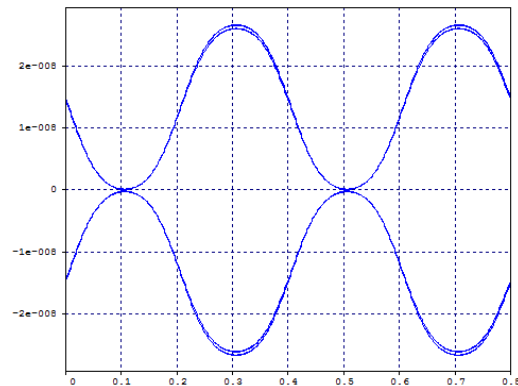
**Tabla 1 Parámetros de monitoreo óptico dependientes de las Degradaciones de las pérdidas y el ruido con FWHM=0MHz.**

Como se observa en la figuras 3 (a) y 3 (b), *el ruido y las pérdidas introducidas en la fibra no son un parámetro significativo en la degradación del desempeño del modelo para el formato RZ-DQPSK*, del mismo modo, como se observa en las tabla 1, aunque el efecto del FWHM se hace evidente en el diagrama del ojo, este no

degrada en mayor medida los parámetros de monitoreo óptico, en donde a la misma distancia de 150Km, el aporte en la degradación de la BER es de  $1e-40$  a  $6.98e-40$  y de la OSNR de 39.40 a 27.82. Por otra parte los valores obtenidos de la potencia en recepción por debajo de la potencia mínima deseada del orden de los -21dBm son debido a que se trabajó con poca amplificación y potencias de transmisión por canal bajas, para evitar los efectos no lineales.



**Figura 3 (a) Diagrama del ojo para un tramo de fibra a 150Km con FWHM=0MHz.**



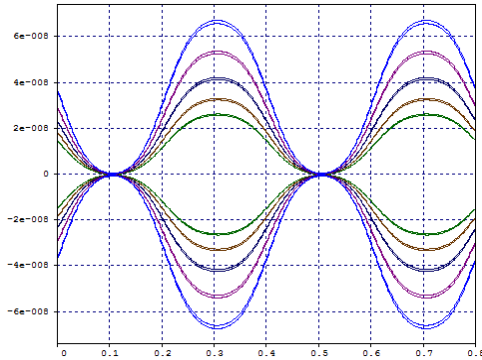
**Figura 3 (b) Diagrama del ojo para un tramo de fibra a 150Km con FWHM=0MHz.**

#### ❖ Análisis del efecto lineal: Dispersión Cromática

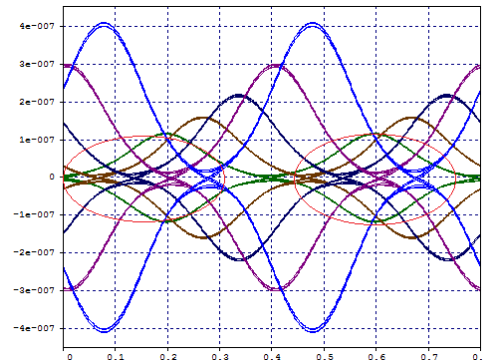
Para determinar el impacto de la Dispersión Cromática para un solo span de 80Km se procede a variar el parámetro dispersión sin tener en cuenta los efectos de las pérdidas o atenuaciones y los efectos de ruido introducidos por los dispositivos EDFA, así mismo se trabaja a potencias bajas para no estimular los efectos no lineales teniendo en cuenta el parámetro jitter y no se tiene en cuenta el efecto del FWHM del láser.

Al igual que para el caso del formato de modulación RZ-DPSK, como primera medida, se compensa la dispersión cromática dentro del modelo, donde para una

tramo de 150Km de fibra se requiere: 25.5Km de fibra DCF para compensar en 100% la CD, 19.125Km de fibra DCF para compensar 75% la CD, 12.75Km de fibra DCF para compensar 50% la CD, 6.375Km de fibra DCF para compensar en 25% la CD y 0Km para no realizar compensación, donde para propósitos de investigación se desprecia la atenuación introducida por la fibra DCF.



**Figura 4 (a) Diagrama del ojo sin efecto de la Dispersión Cromática.**

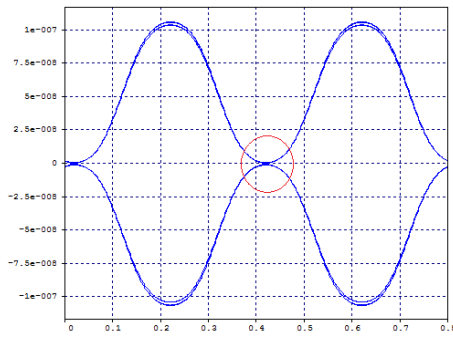


**Figura 4 (b) Efecto de la Dispersión Cromática en el Diagrama del ojo.**

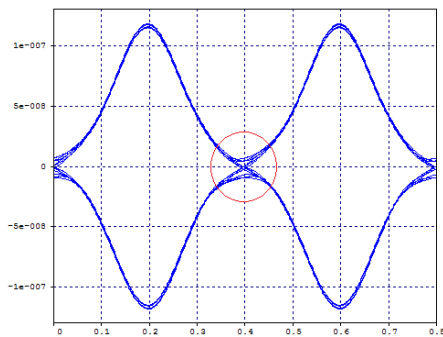
En las figuras 4 (a) Y 4 (b), y tabla 2, se aprecia el efecto de la CD en donde se hace más notable el corrimiento de los diagramas del ojo dependientes de la distancia, debido a la presencia del jitter en el modelo.

Longitud DCF [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]	Jitter [ns]
25.5	195.55	1e-40	39.50	-41.28	36.86	0.000779997
19.125	195.55	1e-40	39.68	-41.29	38.43	0
12.75	195.55	1e-40	39.64	-41.34	34.40	0
6.375	195.55	1e-40	39.52	-41.30	37.48	0
0	195.55	1e-40	39.50	-41.30	38.27	0.00074162

**Tabla 2 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la CD**

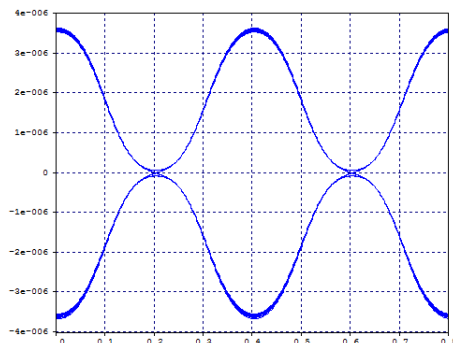


**Figura 5 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD.**

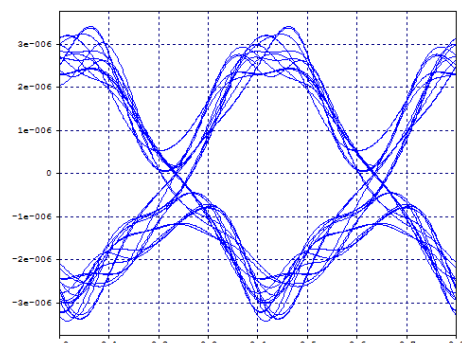


**Figura 5 (b) Diagrama del Ojo sin compensación de la CD.**

Mediante el análisis de las figuras 5 (a) y 5 (b), se determina que realizar compensación para un solo span de fibra no es necesario ni eficiente, dado que implementa más dispositivos y degrada la potencia. Sin embargo, el análisis mediante la implementación de enlaces concatenados da como resultado que realizar compensación de la dispersión cromática es fundamental para mejorar el desempeño del modelo. A continuación, se muestran los efectos de la CD sobre enlaces concatenados, para determinar la dependencia de los parámetros de monitoreo óptico con respecto a este efecto lineal.



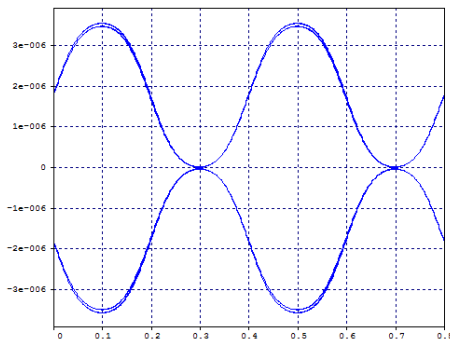
**Figura 6 (a) Diagrama del Ojo compensando 100% la CD.**



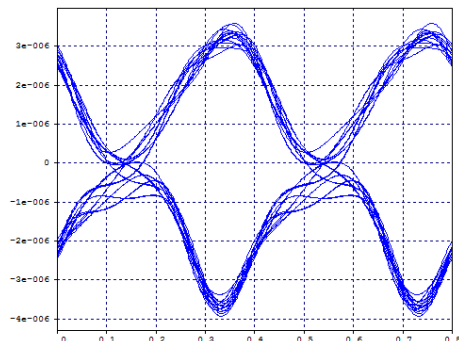
**Figura 6 (b) Diagrama del Ojo para 6 span sin compensación de la CD.**

En las figuras 6 (a) y 6 (b), se observa que al compensar la dispersión cromática para enlaces concatenados, se mejora significativamente el desempeño del modelo

mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK, en donde independientemente de la compensación de los Span, no se mejora el desempeño, sin embargo dicha mejora incrementa significativamente los costos debido a la utilización de más dispositivos de compensación por tramo. Del mismo modo, como se aprecia en las figuras 7 (a) y 7 (b), se procede a verificar cual es el efecto de incrementar el parámetro CD dentro de la fibra sin realizar ninguna compensación, en donde se determina el valor máximo soportado por el formato de modulación con respecto a la variación de la CD.



**Figura 7 (a) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=0.**



**Figura 7 (b) Diagrama del Ojo para un span de 150Km con el parámetro CD=40.**

De lo anterior, para determinar la máxima tolerancia del formato a la dispersión cromática se tuvo en cuenta que no es la BER el parámetro de monitoreo óptico el que se degrada, dado que este se mantiene constante con un valor de  $1e-40$ , por otra parte es el Factor Q el que a medida que se incrementa el parámetro CD comenzó a degradarse hasta valores cercanos a 20dB, donde se puede asociar la máxima tolerancia a la CD con la distancia máxima alcanzada para un Span de fibra, debido a que el máximo valor del parámetro CD soportado por el formato RZ-DQPSK es del orden de los  $40\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  y la distancia máxima se encuentra en 150Km. Se determina de la siguiente forma:



Máximo valor del parámetro CD = 40ps/nm\*Km

Distancia máxima del span = 150Km

Máxima CD total soportada = 150Km x 40ps/nm\*Km = 6.000ps/nm

Mediante este análisis se concluye que el formato de modulación RZ-DQPSK requiere ser compensado en CD para aprovechar al máximo las características de transmisión del formato.

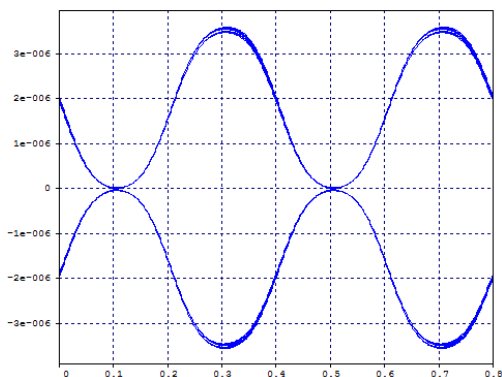
#### ❖ Análisis del efecto lineal: PMD

Para determinar el impacto de la PMD para un solo Span de 80Km, se utiliza un emulador de efectos concentrados (All-Order PMD), donde solo se tienen en cuenta los efectos de polarización y las Birrefringencias, evaluando el parámetro DGD dentro del modelo. Así mismo, para verificar cual es la tolerancia máxima del formato de modulación RZ-DQPSK frente a esta degradación lineal, se toman diferentes rangos de PMD, mediante la modificación de este parámetro dentro de las características de la fibra.

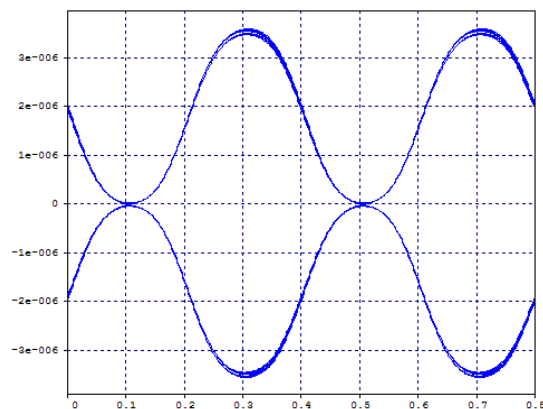
PMD [ps/Km <sup>0.5</sup> ]	Distancia [Km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	P <sub>RX</sub> [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
0	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.2	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.4	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.6	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
0.8	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69
1.0	150	195.55	1e-40	39.71	-26.02	39.69

**Tabla 3 Parámetros de monitoreo óptico debido al efecto de la PMD.**

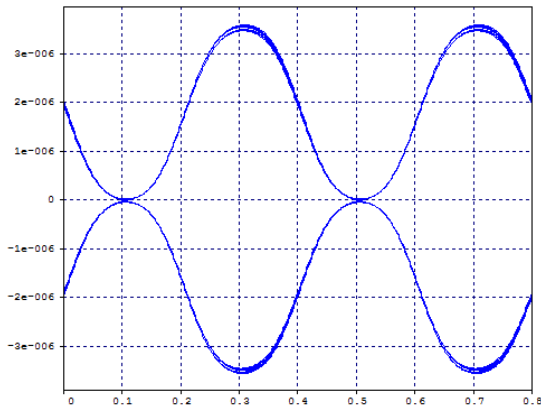
Como se aprecia en los resultados obtenidos en la tabla 3, y en las figuras 8 (a) a 8 (f), el efecto de la PMD sobre el modelo a valores bajos de variación del parámetro y bajo las características del entorno de simulación, no genera ningún tipo de cambio sobre los parámetros de monitoreo óptico.



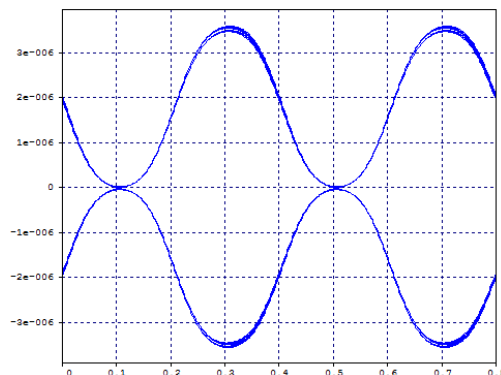
**Figura 8 (a) Diagrama del ojo para una PMD=0**



**Figura 8 (b) Diagrama del ojo para una PMD=0.2**



**Figura 8 (a) Diagrama del ojo para una PMD=1**



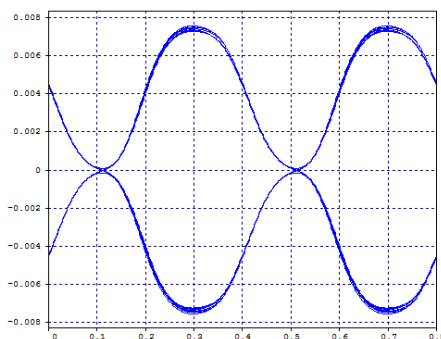
**Figura 8 (b) Diagrama del ojo para una PMD=40**

Para verificar la máxima tolerancia del formato de modulación a la PMD, se generó un rango de valores del orden de los 40 ps/ $\sqrt{\text{Km}}$ . Se debe aclarar que para esta parte del análisis no se tienen en cuenta los efectos de las demás degradaciones, esto con el propósito de verificar solo el efecto de la PMD. Este análisis demuestra

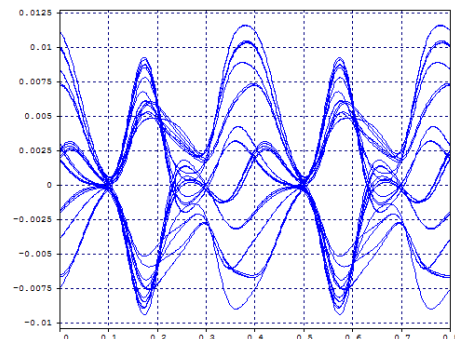
que la tolerancia al efecto de la PMD soportada por el formato de modulación RZ-DQPSK, es superior dado que el modelo no se degrada frente a la variación del parámetro dentro de la Fibra. Así mismo se observa que no existe ninguna variación de la DGD del sistema con respecto al parámetro Seed y con respecto a la variación del parámetro PMD, no generando ningún tipo de distorsión o retardo debido a la propagación de los pulsos de subida y de bajada a diferentes velocidades, haciendo del formato RZ-DQPSK un formato con una alta tolerancia sobre los efectos a la dispersión por modo de polarización, donde podría concluirse que actúa casi que de una forma indiferente ante la presencia de dicha degradación.

#### ❖ Análisis del efecto no lineal: SPM

Como primera medida, se analiza la SPM con respecto a la potencia de transmisión, variando la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser, para determinar si aporta significativamente en la degradación del sistema. Por otra parte, se verifica si el efecto de la dispersión cromática combinado con la SPM podría aportar diferencias en el ensanchamiento de los pulsos mediante el régimen de dispersión normal (CD remanente mayor que 0) y el régimen de dispersión anómalo (CD remanente menor que 0).

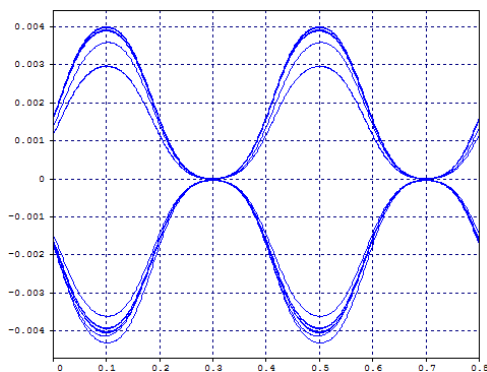


**Figura 9 (a) Diagrama del ojo con potencia EFDA=14dBm.**

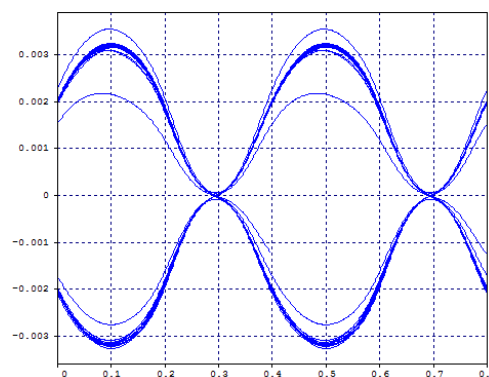


**Figura 9 (b) Diagrama del ojo con potencia EFDA=21dBm.**

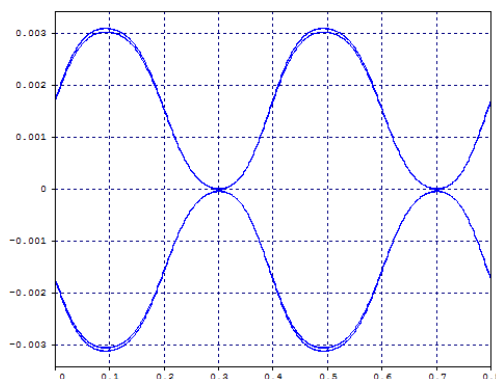
Como se observa en las figuras 9 (a) y 9 (b), el efecto de la SPM debido al incremento de la potencia de los dispositivos de amplificación y la potencia del láser se hace evidente, generando una degradación sobre diagrama del ojo y sobre los parámetros de monitoreo óptico. Por otra parte, se analiza los efectos del régimen de dispersión anómalo y el régimen de dispersión normal, en el modelo, debido a que la dispersión cromática se encuentra fuertemente vinculada con la SPM, pudiendo aportar degradaciones significativas debido al estrechamiento o ensanchamiento de los pulsos transmitidos.



**Figura 10 (a) Diagrama del ojo frente al régimen de dispersión normal ( $CD < 0$ )  $CD = -10$ .**



**Figura 10 (b) Diagrama del ojo frente al régimen de dispersión anómalo ( $CD > 0$ )  $CD = 10$ .**

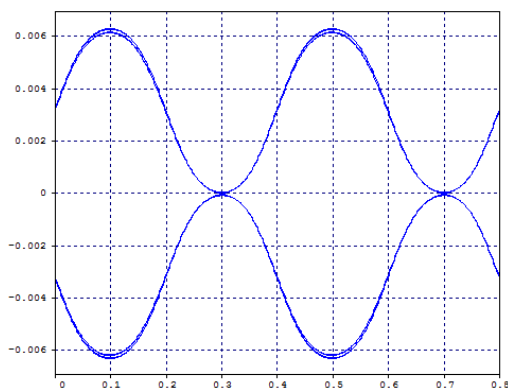


**Figura 10 (c) Diagrama del ojo frente a dispersión cromática cero  $CD = 0$ .**

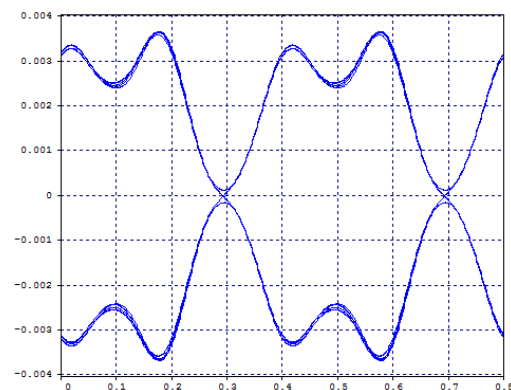
Como se aprecia en las figuras 10 (a) a 10 (c), el único caso para el cual el efecto de la dispersión cromática no genera ningún cambio, es para la dispersión cero, donde se encuentra totalmente compensada por medio de un dispositivo ideal, sin embargo para los cambios generados mediante la variación del parámetro CD, se generan diferencias en el diagrama del ojo, Por otro lado, se concluye que la SPM es uno de los efectos degradantes que se debe tener en cuenta mediante la implementación de este formato de modulación, debido a que es altamente susceptible ante las variaciones de la potencia y frente a la compensación de la CD.

### ❖ Análisis del efecto no lineal: XPM

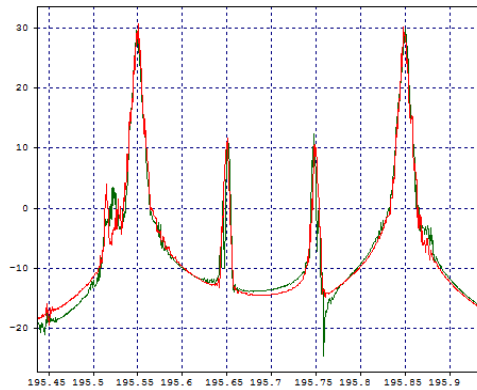
Para determinar el impacto de la XPM para una distancia de 150Km, se asignan a dos de los canales una potencia menor de transmisión y se varía la dispersión cromática dentro de la fibra, del mismo modo que para el formato de referencia NRZ-OOK, donde se asignan unas potencias de: canal 1 y canal 4 con -10dBm y canal 2 y canal 3 con -30dBm. Se debe aclarar que la potencia de los dispositivos EDFA se mantiene en 10dBm, con el fin de estimular los efectos no lineales. Por otro lado, incrementar la potencia de los canales afectaría notablemente el espectro transmitido, no permitiendo verificar los cambios generados por la variación de la CD y las diferencias en las potencias de los canales.



**Figura 11 (a) Efecto de la XPM para una CD = 0.**



**Figura 11 (b) Efecto de la XPM para una CD = 2.**



**Figura 11 (c) Efecto de la XPM sobre el Espectro óptico.**

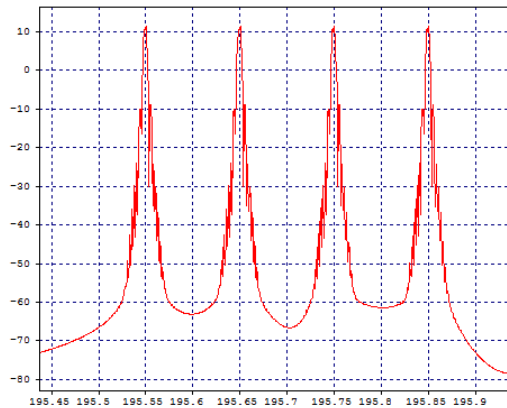
Como se aprecia en las figuras 11 (a) y 11 (b), uno de los modos de verificar el efecto de la XPM sobre el modelo, es mediante la degradación presentada por el diagrama del ojo, debido a la variación de la CD. Por otra parte, es posible mirar el efecto de la XPM como una ampliación del espectro óptico recibido, como se aprecia en la figura 11 (c), donde se compara el espectro a una  $CD=0\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  (verde) y  $CD=4\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  (rojo).

Al analizar el efecto de la XPM sobre el modelo simplificado de red, mediante la implementación del formato de modulación RZ-DQPSK, se pudo apreciar el cambio en los parámetros de monitoreo óptico debido a la dependencia en potencia y al efecto de la CD sobre el sistema, sin embargo, dichos cambios no degradan significativamente el desempeño, permitiendo aprovechar las relaciones de las no linealidades con la potencia y la dispersión cromática, para favorecer el desempeño a nivel general del modelo.

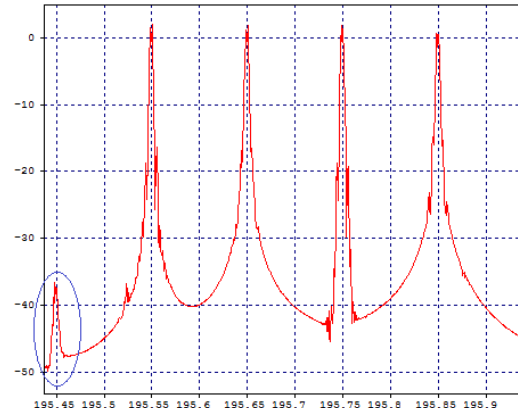
#### ❖ **Análisis del efecto no lineal: FWM**

Para determinar el impacto de la FWM para un solo Span de fibra de 80Km, se compensa el efecto de la dispersión cromática y se varía el parámetro CD dentro de la fibra para analizar el efecto en la potencia recibida y el espectro óptico,

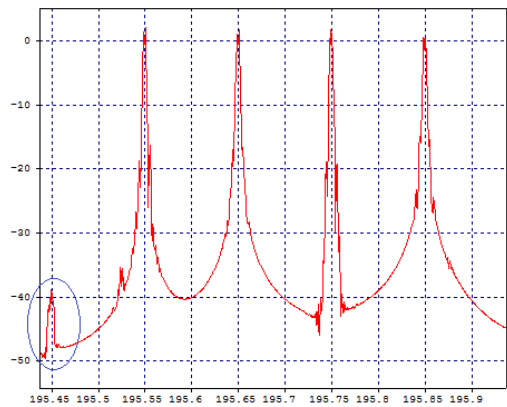
dependientes de la variación de la CD. Como se aprecia en las figuras 12 (a) a 12 (d), el efecto de la FWM se hace evidente para bajos valores de dispersión de la fibra y decrece a medida que la CD incrementa, esto es debido a que a bajos valores de CD o próximos a la condición de dispersión cero, el efecto se maximiza, del mismo modo, a pesar que se puede visualizar el efecto de la FWM este no degrada significativamente el desempeño del modelo.



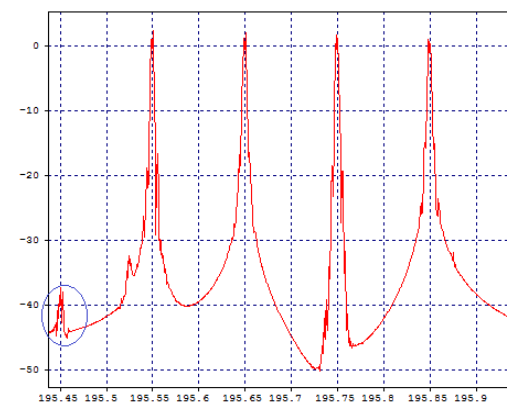
**Figura 4.40 (a) Espectro óptico transmitido.**



**Figura 4.40 (b) Espectro óptico para una CD = 0.**



**Figura 4.40 (c) Espectro óptico para una CD = 1.**



**Figura 4.40 (d) Espectro óptico para una CD = 3.**