

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) PARA REDES DWDM A 10 Gbps Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD.**



**Luisa Fernanda Idrobo Medina  
David Mazorra Solarte**

*Universidad del Cauca*

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones**  
Popayán, Julio 2016

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE FORMATOS DE MODULACIÓN ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) PARA REDES DWDM A 10 Gbps Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD.**



Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

**Luisa Fernanda Idrobo Medina  
David Mazorra Solarte**

**Director: Mag. Alejandro Toledo Tovar**

*Universidad del Cauca*

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones**  
Popayán, Julio 2016

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
CAPITULO 1. INTRODUCCION A REDES DWDM, CARACTERIZACIÓN Y EFECTOS DE LA PMD, TECNICAS Y FORMATOS DE MODULACIÓN .....	14
<b>1.1 REDES DE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA Densa -DWDM ..</b>	<b>14</b>
<b>1.1.1 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA -WDM.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES DWDM .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN - PMD.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.1 BIRREFRINGENCIA .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 TECNICAS DE MODULACION .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3.1 MODULADOR MACH-ZEHNDER-MZM .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3.2 INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER- MZI .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.3 FUNCIONAMIENTO DEL MZI .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4 FORMATOS DE MODULACIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4.1 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE – PSK .....</b>	<b>24</b>
<b>1.4.2 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DIFERENCIAL DE FASE - DPSK .....</b>	<b>24</b>
<b>1.4.2.1 TRANSMISOR DPSK .....</b>	<b>25</b>
<b>1.4.2.2 EL RECEPTOR DPSK .....</b>	<b>26</b>
<b>1.4.3 MODULACIÓN PARCIAL POR DESPLAZAMIENTO DIFERENCIAL DE FASE – PDPSK ..</b>	<b>27</b>
<b>1.4.4 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO POR CUADRATURA DIFERENCIAL DE FASE- DQPSK .....</b>	<b>29</b>
<b>1.4.5 BACK-TO-BACK .....</b>	<b>32</b>
<b>1.4.5.1 BACK-TO-BACK RZ-PDPSK.....</b>	<b>32</b>
<b>1.4.5.2 BACK-TO-BACK RZ-DQPSK .....</b>	<b>34</b>
<b>1.5 PARAMETROS DE DESEMPEÑO .....</b>	<b>36</b>
<b>1.5.1 DIAGRAMA DEL OJO .....</b>	<b>36</b>
<b>1.5.2 TASA DE ERROR DE BIT -BER.....</b>	<b>37</b>
<b>1.5.3 FACTOR DE CALIDAD Q .....</b>	<b>37</b>
CAPITULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN .....	39
<b>2.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>41</b>

<b>2.2.1</b>	<b>DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO</b> .....	41
<b>2.2.1.1</b>	<b>ESCENARIO DE SIMULACIÓN:</b> .....	42
<b>2.2.1.2</b>	<b>CASOS DE ESTUDIO:</b> .....	43
<b>2.2.2</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN</b> .....	45
<b>2.2.3</b>	<b>EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN</b> .....	47
<b>2.2.4</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN</b> .....	47
<b>CAPITULO 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACION Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD</b> .....		49
<b>3.1</b>	<b>ESCENARIO 1: RZ-PDPSK</b> .....	49
<b>3.1.1</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 1: VARIACIÓN NÚMERO DE CANALES</b> .....	49
<b>3.1.2</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 2: VARIACIÓN LONGITUD</b> .....	54
<b>3.1.3</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 3: VARIACIÓN COEFICIENTE PMD</b> .....	60
<b>3.1.4</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 4: “ESCENARIO REAL DE SIMULACIÓN”</b> .....	65
<b>3.2</b>	<b>ESCENARIO 2: RZ-DQPSK</b> .....	74
<b>3.2.1</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 1: VARIACIÓN NÚMERO DE CANALES</b> .....	74
<b>3.2.2</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 2: VARIACIÓN LONGITUD</b> .....	78
<b>3.2.3</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 3: VARIACIÓN COEFICIENTE PMD</b> .....	83
<b>3.2.4</b>	<b>CASO DE ESTUDIO 4: “ESCENARIO REAL DE SIMULACIÓN”</b> .....	88
<b>CAPITULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN ESTUDIADOS Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD</b> .....		97
<b>HALLAZGOS DESFASES TEMPORALES (DELAYS)</b> .....		109
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....		122
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	122
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	123
<b>5.3</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS</b> .....	123
<b>REFERENCIAS</b> .....		124

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. 1 RESTRICCIONES DE TRANSMISIÓN VS TASAS DE LÍNEA.....	19
TABLA 1. 2 TRANSICIONES DE ESTADO DE ACUERDO A LOS DUBITS.....	30
TABLA 2. 1 PARÁMETROS DE LA FIBRA CORNING SMF-28 [33].....	46
TABLA 2. 2 CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO DE MODULACIÓN .....	47
TABLA 3. 1 DIFERENCIA VALORES PICO .....	51
TABLA 3. 2 ERRORES VS NO. DE CANALES ESPECTRO RZ-PDPSK .....	53
TABLA 3. 3 ERROR DE LA APERTURA DEL OJO CON VS A LAS VARIACIONES DE LONGITUD PARA RZ-PDPSK RESPECTO AL B2B.....	60
TABLA 3. 4 ERROR DE LA APERTURA DEL OJO CON VS A LAS VARIACIONES DE COEFICIENTE DE PMD PARA RZ- PDPSK RESPECTO AL B2B.....	65
TABLA 3. 5 ERRORES VS NO. DE CANALES ESPECTRO RZ-DQPSK .....	78
TABLA 3. 6 ERROR DE LA APERTURA DEL OJO CON VS A LAS VARIACIONES DE LONGITUD PARA RZ-DQPSK RESPECTO AL B2B.....	83
TABLA 3. 7 VALORES DE ERROR- COEFICIENTE DE PMD PARA RZ-DQPSK.....	88
TABLA 4. 1 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE FORMATOS DE MODULACIÓN RZ-PDPSK Y R-DQPSK.....	106
TABLA 4. 2 ERRORES ESPECTRO: LONGITUD Y COEFICIENTE PMD, RZ-PDPSK. ....	107
TABLA 4. 3 ERRORES ESPECTRO: LONGITUD Y COEFICIENTE PMD, EN DQPSK .....	108
TABLA 4. 4 DIFERENCIA DE LOS ESPECTROS PARA RZ-PDPSK Y RZ-DQPSK.....	108
TABLA 4. 5 PENDIENTES DE LA REGRESIÓN LINEAL DE LOS DELAYS RZ-PDPSK .....	120
TABLA 4. 6 PENDIENTES DE LA REGRESIÓN LINEAL DE LOS DELAYS RZ-DQPSK .....	120

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 REPRESENTACIÓN DE LA PMD [1] .....	16
FIGURA 1. 2 SECCIÓN TRANSVERSAL DE FIBRA ÓPTICAS ILUSTRANDO LAS CAUSAS DE BIRREFRINGENCIA [9] .....	17
FIGURA 1. 3 ESQUEMA DE PROPAGACIÓN DE DOS MODOS DE POLARIZACIÓN EN UNA FIBRA ÓPTICA BIRREFRINGENTE [11] .....	18
FIGURA 1. 4 CONCATENACIÓN ALEATORIA DE ELEMENTOS BIRREFRINGENTES COMO REPRESENTACIÓN DE UNA FIBRA [9].....	19
FIGURA 1. 5 FUNCIÓN DE TRANSMISIÓN MZI [13].....	20
FIGURA 1. 6 ESQUEMÁTICO BÁSICO DE UN MZI [14] .....	20
FIGURA 1. 7 CAMINOS POSIBLES DE ENTRADA DE UN MZI [14] .....	21
FIGURA 1. 8 INCIDENCIA FOTÓN CAMINO INFERIOR SOBRE EL PRIMER [14] .....	22
FIGURA 1. 9 ALGUNOS FORMATOS DE MODULACIÓN Y SUS DERIVACIONES [16].....	23
FIGURA 1. 10 GENERACIÓN DE SEÑALES MODULADAS EN FASE MEDIANTE UN MZI [18] .....	25
FIGURA 1. 11 TRANSMISOR ÓPTICO DPSK CON UN PULSE CARVER RZ [19] .....	26
FIGURA 1. 12 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN TRANSMISOR RZ-DPSK [19].....	26
FIGURA 1. 13 DETECCIÓN DIRECTA DE UNA SEÑAL DPSK [13].....	27
FIGURA 1. 14 RECEPTOR DPSK TÍPICO [20] .....	27
FIGURA 1. 15 ESPECTRO DE SEÑAL RZ-PDPSK [21].....	28

FIGURA 1. 16 MEJORA DE 3 DB EN LA DETECCIÓN BALANCEADA DE SEÑALES DPSK Y PDPSK CON RESPECTO A SEÑALES OOK [13].....	29
FIGURA 1. 17 CAMBIOS DE FASE MODULACIÓN DQPSK.....	29
FIGURA 1. 18 PROBABILIDAD DE ERROR PARA DQPSK. [25] .....	31
FIGURA 1. 19 MODULADOR DQPSK [25].....	31
FIGURA 1. 20 DEMODULADOR DQPSK [25].....	32
FIGURA 1. 21 TRANSMISOR Y RECEPTOR RZ-PDPSK .....	33
FIGURA 1. 22 DIAGRAMA DEL OJO SALIDA DEL SISTEMA RZ-PDPSK-65%.....	33
FIGURA 1. 23 DIAGRAMA DEL OJO TEÓRICO SALIDA DEL SISTEMA RZ-PDPSK [26].....	33
FIGURA 1. 24 ESPECTRO B2B EN FRECUENCIA .....	34
FIGURA 1. 25 TRANSMISOR Y RECEPTOR RZ-DQPSK .....	34
FIGURA 1. 26 DIAGRAMA DE OJO A SALIDA DEL SISTEMA RZ-DQPSK .A) VISUALIZADOR Q B). VISUALIZADOR P .....	35
FIGURA 1. 27 A) COMPONENTE P A LA SALIDA DEL SISTEMA. B) COMPONENTE Q A LA SALIDA DEL SISTEMA RZ-DQPSK [19] .....	35
FIGURA 1. 28 ESPECTRO ÓPTICO B2B EN FRECUENCIA .....	35
FIGURA 1. 29 DIAGRAMA DEL OJO CON Y SIN EFECTOS DE LA PMD [28].....	36
FIGURA 2. 1 ESCENARIOS Y CASOS DE SIMULACIÓN. ....	42
FIGURA 2. 2 ESQUEMA ESCENARIO GENERAL DE SIMULACIÓN ESCENARIO .....	43
FIGURA 2. 3 CASO DE ESTUDIO 1 .....	44
FIGURA 2. 4 CASO DE ESTUDIO 2 .....	44
FIGURA 2. 5 CASO DE ESTUDIO 3 .....	45
FIGURA 2. 6 CASO DE ESTUDIO 4 .....	45
FIGURA 2. 7 DIAGRAMA DE FLUJO, CASOS DE USO ANÁLISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN. ....	48
FIGURA 3. 1 RZ-PDPSK PARA 1 CANAL.....	50
FIGURA 3. 2 RZ-PDPSK PARA 4 CANALES .....	50
FIGURA 3. 3 RZ-PDPSK PARA 10 CANALES .....	51
FIGURA 3. 4 ESPECTRO ÓPTICO RZ-PDPSK PARA 1 CANAL.....	52
FIGURA 3. 5 ESPECTRO ÓPTICO RZ-PDPSK PARA 4 CANALES.....	52
FIGURA 3. 6 ESPECTRO ÓPTICO RZ-PDPSK PARA 10 CANALES .....	52
FIGURA 3. 7 GRÁFICO CONSUMO DIARIO DE INTERNET EN COLOMBIA .....	54
FIGURA 3. 8 DGD VS LONGITUD RZ-PDPSK, PARA 4 CANALES .....	55
FIGURA 3. 9 AMPLIACIÓN FIGURA 3. 8.....	55
FIGURA 3. 10 FACTOR Q VS VARIACIÓN DE LONGITUD .....	56
FIGURA 3. 11 FACTOR BER VS VARIACIÓN DE LONGITUD.....	56
FIGURA 3. 12 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD PARA 4 CANAL RZ-PDPSK. ESPECTRO EN X.....	57
FIGURA 3. 13 RESULTADOS REGRESIÓN LINEAL DE LA HERRAMIENTA CURVE FITTING TOOLBOX DE MATLAB .....	57
FIGURA 3. 14 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 4 CANALES.....	58
FIGURA 3. 15 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD PARA 4 CANAL RZ-PDPSK. ESPECTRO EN Y.....	59
FIGURA 3. 16 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 4 CANALES.....	59
FIGURA 3. 17 APERTURA DE OJO PARA VARIACIONES DE LONGITUD .....	60

FIGURA 3. 18 DGD VS COEFICIENTE DE PMD, RZ-PDPSK, PARA 4 CANALES.....	61
FIGURA 3. 19 AMPLIACIÓN FIGURA 3. 18 .....	61
FIGURA 3. 20 FACTOR Q VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD .....	62
FIGURA 3. 21 FACTOR BER VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD.....	62
FIGURA 3. 22 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANAL RZ-PDPSK. ESPECTRO EN X .....	63
FIGURA 3. 23 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANALES.....	63
FIGURA 3. 24 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANAL RZ- PDPSK. ESPECTRO EN Y.....	64
FIGURA 3. 25 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANALES.....	64
FIGURA 3. 26 APERTURA DE OJO PARA VARIACIONES DE COEFICIENTE DE PMD .....	65
FIGURA 3. 27 ESQUEMÁTICO ESCENARIO REAL RZ-PDPSK .....	66
FIGURA 3. 28 VARIACIÓN BER VS DCF .....	67
FIGURA 3. 29 VARIACIÓN Q VS DCF.....	67
FIGURA 3. 30 DGD VS VARIACIONES COEFICIENTE PMD (0-0.2) PARA RZ-PDPSK .....	68
FIGURA 3. 31 DGD VS VARIACIONES COEFICIENTE PMD (0-1.1) PARA RZ-PDPSK .....	68
FIGURA 3. 32 ERROR EN ESPECTRO X .....	69
FIGURA 3. 33 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO EN EL ESPECTRO X.....	69
FIGURA 3. 34 ERROR EN ESPECTRO Y .....	70
FIGURA 3. 35 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO EN EL ESPECTRO Y.....	70
FIGURA 3. 36 VARIACIÓN Q VS COEFICIENTE DE PMD .....	71
FIGURA 3. 37 VARIACIÓN BER VS COEFICIENTE DE PMD .....	71
FIGURA 3. 38 VARIACIONES DE POTENCIA DE RECEPCIÓN VS COEFICIENTE DE PMD.....	72
FIGURA 3. 39 SEÑAL ELÉCTRICA A LA SALIDA DEL RECEPTOR RZ-PDPSK .....	72
FIGURA 3. 40 DELAYS PARA CADA VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD PARA RZ-PDPSK .....	73
FIGURA 3. 41 REGRESIÓN LINEAL DELAYS VS VARIACIONES DE COEFICIENTE DE PMD RZ-PDPSK.....	73
FIGURA 3. 42 RZ-DQPSK PARA 1 CANAL .....	74
FIGURA 3. 43 RZ-DQPSK PARA 4 CANALES.....	75
FIGURA 3. 44 RZ-DQPSK PARA 10 CANALES.....	76
FIGURA 3. 45 ESPECTRO ÓPTICO RZ-DQPSK PARA 1 CANAL .....	76
FIGURA 3. 46 ESPECTRO ÓPTICO RZ-DQPSK PARA 4 CANALES.....	77
FIGURA 3. 47 ESPECTRO ÓPTICO RZ-DQPSK PARA 10 CANALES.....	77
FIGURA 3. 48 DGD VS LONGITUD RZ-DQPSK, PARA 4 CANALES.....	79
FIGURA 3. 49 AMPLIACIÓN FIGURA 3. 48 .....	79
FIGURA 3. 50 FACTOR Q VS VARIACIÓN DE LONGITUD .....	80
FIGURA 3. 51 FACTOR BER VS VARIACIÓN DE LONGITUD.....	80
FIGURA 3. 52 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD PARA 4 CANAL RZ-DQPSK. ESPECTRO EN X .....	81
FIGURA 3. 53 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 4 CANALES.....	81
FIGURA 3. 54 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD PARA 4 CANAL RZ-DQPSK. ESPECTRO EN Y .....	82
FIGURA 3. 55 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 4 CANALES.....	82

FIGURA 3. 56 APERTURA DE OJO PARA VARIACIONES DE LONGITUD .....	83
FIGURA 3. 57 DGD VS COEFICIENTE DE PMD, RZ-DQPSK, PARA 4 CANALES. ....	84
FIGURA 3. 58 AMPLIACIÓN FIGURA 3. 57 .....	84
FIGURA 3. 59 FACTOR Q VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD .....	85
FIGURA 3. 60 FACTOR BER VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD.....	85
FIGURA 3. 61 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANAL RZ-DQPSK. ESPECTRO EN X .....	86
FIGURA 3. 62 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANALES.....	86
FIGURA 3. 63 ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANAL RZ- DQPSK. ESPECTRO EN Y .....	87
FIGURA 3. 64 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANALES.....	87
FIGURA 3. 65 APERTURA DE OJO PARA VARIACIONES DE COEFICIENTE DE PMD .....	88
FIGURA 3. 66 ESQUEMÁTICO ESCENARIO REAL RZ-DQPSK.....	89
FIGURA 3. 67 VARIACIÓN BER VS DCF .....	90
FIGURA 3. 68 VARIACIÓN Q VS DCF.....	90
FIGURA 3. 69 DGD VS VARIACIONES COEFICIENTE PMD (0-0.2) PARA RZ-DQPSK.....	91
FIGURA 3. 70 DGD VS VARIACIONES COEFICIENTE PMD (0-1.1) PARA RZ-DQPSK.....	91
FIGURA 3. 71 ERROR EN ESPECTRO X .....	92
FIGURA 3. 72 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO EN EL ESPECTRO X.....	92
FIGURA 3. 73 ERROR EN ESPECTRO Y .....	92
FIGURA 3. 74 REGRESIÓN LINEAL DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO EN EL ESPECTRO Y.....	93
FIGURA 3. 75 VARIACIÓN Q VS COEFICIENTE DE PMD .....	93
FIGURA 3. 76 VARIACIÓN BER VS COEFICIENTE DE PMD .....	94
FIGURA 3. 77 VARIACIONES DE POTENCIA DE RECEPCIÓN VS COEFICIENTE DE PMD.....	94
FIGURA 3. 78 SEÑAL ELÉCTRICA A LA SALIDA DEL RECEPTOR RZ-DQPSK.....	95
FIGURA 3. 79 DELAYS PARA CADA VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD PARA RZ-DQPSK.....	95
FIGURA 3. 80 REGRESIÓN LINEAL DELAYS VS VARIACIONES COEFICIENTE PMD RZ-DQPSK .....	96
FIGURA 4. 1 ERRORES DE LOS ESPECTROS: LONGITUD Y COEFICIENTE DE PMD.....	107
FIGURA 4. 2 ERRORES DE LOS ESPECTROS: LONGITUD Y COEFICIENTE DE PMD .....	108
FIGURA 4. 3 CONFIGURACIÓN PARÁMETROS VISUALIZADOR ELÉCTRICO.....	110
FIGURA 4. 4 DESFASE DE SEÑALES ELÉCTRICAS A LA SALIDA DEL VISUALIZADOR ELÉCTRICO .....	110
FIGURA 4. 5 AMPLIACIÓN FIGURA 4. 4 .....	111
FIGURA 4. 6 DELAYS CON RESPECTO B2B VS NO. VARIACIONES LONGITUD- A) RZ-PDPSK B) P-FASE RZ-DQPSK C) Q-CUADRATURA-RZ-DQPSK- PARA 1 CANAL .....	111
FIGURA 4. 7 DELAYS CON RESPECTO B2B VS NO. VARIACIONES COEFICIENTE PMD- A) RZ-PDPSK B) P-FASE RZ- DQPSK C) Q-CUADRATURA-RZ-DQPSK- PARA 1 CANAL.....	112
FIGURA 4. 8 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 1 CANAL- RZ-PDPSK .....	112
FIGURA 4. 9 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 1 CANAL- RZ- PDPSK .....	113
FIGURA 4. 10 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 1 CANAL- RZ-DQPSK-P (FASE) .....	113
FIGURA 4. 11 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 1 CANAL- RZ-DQPSK-Q (CUADRATURA).....	113

FIGURA 4. 12 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 1 CANAL- RZ-DQPSK-P (FASE).....	114
FIGURA 4. 13 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 1 CANAL- RZ-DQPSK-Q (CUADRATURA).....	114
FIGURA 4. 14 DELAYS CON RESPECTO B2B VS NO. VARIACIONES LONGITUD- A) RZ-PDPSK B) P-FASE RZ-DQPSK C) Q-CUADRATURA-RZ-DQPSK- PARA 4 CANALES .....	114
FIGURA 4. 15 DELAYS CON RESPECTO B2B VS NO. VARIACIONES COEFICIENTE PMD- A) RZ-PDPSK B) P-FASE RZ-DQPSK C) Q-CUADRATURA-RZ-DQPSK- PARA 4 CANALES .....	115
FIGURA 4. 16 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 4 CANALES- RZ-PDPSK..	115
FIGURA 4. 17 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANALES- RZ-PDPSK .....	115
FIGURA 4. 18 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA PARA 4 CANALES - RZ-DQPSK-P (FASE).....	116
FIGURA 4. 19 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA PARA 4 CANALES - RZ-DQPSK-Q (CUADRATURA).....	116
FIGURA 4. 20 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA PARA 4 CANALES - RZ-DQPSK-P (FASE).....	116
FIGURA 4. 21 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 4 CANALES- RZ-DQPSK-Q (CUADRATURA).....	117
FIGURA 4. 22 DELAYS CON RESPECTO B2B VS NO. VARIACIONES LONGITUD- A) RZ-PDPSK B) P-FASE RZ-DQPSK C) Q-CUADRATURA-RZ-DQPSK- PARA 10 CANALES .....	117
FIGURA 4. 23 DELAYS CON RESPECTO B2B VS NO. VARIACIONES COEFICIENTE PMD- A) RZ-PDPSK B) P-FASE RZ-DQPSK C) Q-CUADRATURA-RZ-DQPSK- PARA 10 CANALES .....	117
FIGURA 4. 24 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 10 CANALES- RZ-PDPSK.	118
FIGURA 4. 25 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 10 CANALES- RZ-PDPSK .....	118
FIGURA 4. 26 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 10 CANALES- RZ-DQPSK-P (FASE) .....	118
FIGURA 4. 27 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE LONGITUD, PARA 10 CANALES- RZ-DQPSK-Q (CUADRATURA).....	119
FIGURA 4. 28 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 10 CANALES- RZ-DQPSK-P (FASE).....	119
FIGURA 4. 29 REGRESIÓN LINEAL DEL DELAY VS VARIACIÓN DE COEFICIENTE DE PMD, PARA 10 CANALES- RZ-DQPSK-Q (CUADRATURA).....	119
FIGURA 4. 30 VARIACIONES DE PENDIENTE VS LONGITUD .....	120
FIGURA 4. 31 VARIACIONES DE PENDIENTE VS COEFICIENTE DE PMD.....	121

## ACRÓNIMOS

<b>AOPMD</b>	All Order PMD
<b>ASK</b>	<i>Amplitude-Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Amplitud.
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
<b>BS</b>	<i>Beam Splitter</i>
<b>CD</b>	<i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersión Cromática.
<b>CWDM</b>	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación Dispersa por División de Longitud de Onda.
<b>DCF</b>	<i>Dispersion Compensating Fibers</i> , Fibras Compensadoras de Dispersión.
<b>DCM</b>	<i>Dispersion Compensation Module</i>
<b>DGD</b>	<i>Differential group Delay</i> , Retardo Diferencial de Grupo.
<b>DPSK</b>	<i>Differential Polarization Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase
<b>CW</b>	<i>Continuous Wave</i> , Onda Continua
<b>DML</b>	<i>Directly Modulated Laser</i> , Laser Directamente Modulado
<b>DQPSK</b>	<i>Differential Quadrature Polarization Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Cuadratura
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda.
<b>EAM</b>	<i>Electro Absorption Modulator</i> , Modulador por Electro Absorción
<b>EDFA</b>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de fibra dopado de Erblio.
<b>FSK</b>	<i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia
<b>FWM</b>	<i>Four Wave Mixing</i> , Mezcla de Cuarta Onda.
<b>ISI</b>	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>LASER</b>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> , Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación.
<b>LONG</b>	Longitud de la Fibra

<b>MZI</b>	<i>Mach-Zehnder Interferometer</i> , Interferómetro de Mach-Zehnder
<b>MZM</b>	<i>Mach-Zehnder Modulator</i> , Modulador Mach-Zehnder.
<b>NRZ</b>	<i>Non Return to zero</i> , No Retorno a Cero.
<b>OOK</b>	<i>On-Off Keying</i> , Modulación por Encendido y apagado.
<b>OSNR</b>	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Óptico.
<b>PDPSK</b>	<i>Partial Differential Polarization Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase Parcial
<b>PMD</b>	<i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización.
<b>PM</b>	<i>Phase Modulator</i> , Modulador de Fase
<b>PolSK</b>	<i>Polarization Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Polarización
<b>PSK</b>	<i>Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase
<b>Q</b>	<i>Q factor</i> , Factor de Calidad
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Polarization Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Cuadratura
<b>RZ</b>	<i>Return to Zero</i> , Retorno a Cero.
<b>SM</b>	<i>Single-Mode</i> , Monomodo.
<b>SPM</b>	<i>Self Phase Modulation</i> , Modulación de Fase Inducida.
<b>SPT</b>	<i>Spectral Propagation Technique</i> , Técnica de Propagación Espectral.
<b>SSMF</b>	<i>Standar Single Mode Fiber</i> , Fibra Monomodo Estándar.
<b>TIC</b>	<i>Tecnología de la Información y Comunicaciones</i>
<b>VBS</b>	<i>Variable Bandwidth Simulation</i> , Ancho de Banda Variable de Simulación.
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda.
<b>XPM</b>	<i>Cross Phase Modulation</i> , Modulación por Cruzamiento de Fase

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento y la evolución de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs) en los últimos años, ha generado una exigencia cada vez mayor de ancho de banda, por parte de los usuarios, haciendo necesaria la implementación de redes ópticas de 10 Gbps. Surgiendo las redes WDM (Wavelength Division Multiplexing, multiplexación por división de longitud de onda) y en complemento DWDM (Dense Wave División Multiplexing, Multiplexación por División en Longitudes de Ondas Densas ), que brindan a largas distancias mayor capacidad de transmisión, a su vez requieren del uso de formatos de modulación avanzados para enfrentar impedimentos que puedan llegar a degradar la señal, tales como: la Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), atenuación, ruido, la *Auto Modulación de Fase (SPM, Self Phase Modulation)*, *Modulación de Fase Cruzada (XPM, Cross Phase Modulation)*, *Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, Four Wave Mixing)*, entre otras. Dentro de estas degradaciones, se resalta la PMD, la cual es uno de los problemas más graves para las redes de comunicaciones por fibra óptica de muy alta velocidad [1].

La distorsión de la señal causado por la PMD es la mayor limitación que se tiene en trasmisiones de larga distancia, con velocidades iguales o superiores a 10 Gbp; esto conduce a la degradación del desempeño del sistema, especialmente en las líneas de transmisión que existen actualmente [2].

La PMD difiere de muchas de las propiedades de una red de comunicaciones ópticas, ya que el deterioro causado por la PMD cambia estocásticamente con la longitud de onda y el tiempo, es decir, que no se puede predecir un deterioro del sistema para una longitud de onda o un tiempo específico. En general, no se puede caracterizar la PMD de una red con una precisión anticipada, ya que una medición muestreada es solo una porción del ensamblaje estadístico [2].

El principal objetivo para determinar la tolerancia a la PMD de una red de transmisión óptica, es encontrar hasta que nivel el enlace de fibra óptica puede ser operativo con una disponibilidad y parámetros de desempeño deseados; a pesar del deterioro causado por la PMD, la forma establecida para hacer frente a este problema, es determinar la tolerancia del sistema con respecto al Desfase de Grupo Diferencial (DGD, *Differential Group Delay*), en el que un valor típico para este, podría ser aproximadamente del 10% del periodo de bit (para el caso de estudio 10 Gbps sería aproximadamente de 1ps) [3].

El presente proyecto, centra su estudio en la realización de un análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD. Para la realización del trabajo de grado y el abordaje de los temas necesarios para el mismo, el contenido se divide en cinco capítulos:

En el **capítulo 1**: se presentan las características de las redes ópticas DWDM, caracterización y efectos de la PMD, técnicas de modulación, formatos de modulación DQPSK, PDPSK y parámetros de desempeño.

En el **capítulo 2**: se define la metodología y escenarios de simulación que se llevarán a cabo, con el fin de realizar el análisis comparativo de los formatos de modulación estudiados, frente a la PMD.

En el **capítulo 3**: se presenta el análisis y la evaluación de las diferentes formas de disminuir el impacto de la PMD a nivel de simulación.

En el **capítulo 4**: se presenta el análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación estudiados y su tolerancia frente a la PMD.

Finalmente en el **capítulo 5**, se presentan las conclusiones del trabajo de grado, recomendaciones y trabajos futuros a desarrollar en esta área.

## **CAPITULO 1. INTRODUCCION A REDES DWDM, CARACTERIZACIÓN Y EFECTOS DE LA PMD, TÉCNICAS Y FORMATOS DE MODULACIÓN**

### **1.1 REDES DE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA DENSA -DWDM**

DWDM es una técnica de multiplexación muy similar a la WDM, que se utiliza en medios de transmisión electromagnéticos. Varias señales portadoras (ópticas) se transmiten por una única fibra óptica, utilizando distintas longitudes de onda de un haz de luz para cada una de ellas. Cada portadora óptica forma un canal óptico, que podrá ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio (fibra óptica) y contener diferente tipo de tráfico. De esta manera se puede multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica, así como facilitar comunicaciones bidireccionales. Se trata de una técnica de transmisión muy atractiva para los operadores de telecomunicaciones, ya que les permite aumentar su capacidad sin tener más cables [4]

Está definido para la banda de 1530 – 1610nm, espaciado entre canales de 0.8nm y 1.6nm.

#### **1.1.1 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA -WDM**

WDM es una técnica, que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda en la misma dirección y al mismo tiempo, usando luz procedente de un láser o un LED [5].

El principio de funcionamiento de WDM se basa en el transporte de varios flujos de información, cada uno codificado sobre longitud de onda distinta y multiplexados dentro de una única fibra. De esta manera se logra incrementar de manera considerable la capacidad de fibra.

En WDM se distinguen típicamente cuatro familias de sistemas: DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) de ultra larga distancia, DWDM de larga distancia, DWDM metropolitano, y CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Las cuatro familias de sistemas WDM utilizan componentes ópticos distintos, siendo más complejos y caros los que soportan mayores capacidades por canal y agregadas, y los que soportan mayores distancias de transmisión. [1] [6]

En DWDM de larga y ultra larga distancia el espaciado de frecuencias actual es de 50-100 GHz (0,4-0,8 nm), en DWDM metropolitano de 100-200 GHz (0,8-1,6 nm), y en CWDM de 2.500 GHz (20 nm). En cuanto al número de longitudes de onda, mientras en DWDM se utilizan hasta 160 y en DWDM metropolitano hasta 40, en CWDM se suelen utilizar hasta 18. [6]

Mientras los sistemas DWDM de larga y ultra larga distancia soportan canales de hasta 40 Gbps, la mayoría de los sistemas DWDM metropolitanos soportan hasta 10 Gbps y los CWDM actuales tienen su límite en 2,5 Gbps. En cuanto a las distancias que se suelen cubrir, los sistemas DWDM de ultra larga distancia alcanzan hasta unos 4.000 Km sin regeneración electro-óptica, los de larga distancia

hasta unos 800 Km, los DWDM metropolitanos hasta unos 300 Km, y los CWDM hasta unos 80 Km. [6]

A diferencia del CWDM, en DWDM se consigue mayor número de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos DCM (Dispersion Compensation Modules); de esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Actualmente se pueden conseguir 40, 80 ó 160 canales ópticos separados entre sí 100 GHz, 50 GHz ó 25 GHz, respectivamente. [1]

La aparición de nuevos formatos de modulación avanzados, permite la mitigación de las distorsiones producidas por las no linealidades de la fibra, mejorando la calidad de la señal percibida por el receptor. [1]

### **1.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES DWDM**

El sistema DWDM tiene ciertas características de nivel físico. A continuación se describen las funciones principales [7]:

1. "El transponder, o trasladador de longitud de onda, acepta la entrada en la forma de un láser estándar monomodo o multimodo. La entrada se puede presentar de distintos medios físicos y con diferentes tipos de tráfico. La longitud de onda de cada señal de entrada es mapeada a una longitud de onda DWDM".
2. "Luego se produce una combinación de señales; para esto se usan los multiplexores. Las longitudes de onda DWDM del transponder son multiplexadas en una sola señal óptica y enviada a la fibra. El sistema puede incluir la posibilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexor, que pueden venir, por ejemplo, de un satélite".
3. "Hay alguna pérdida inherente asociada a la multiplexación y la demultiplexación. Esta pérdida depende del número de canales, pero se puede mitigar con amplificadores ópticos que amplían todas las longitudes de onda a la vez sin conversión eléctrica. Para esto se utiliza un postamplificador a la salida del sistema".
4. "El siguiente paso es la transmisión de señales que se hace por la fibra óptica. Sin embargo, los efectos de diafonía y la degradación o pérdida de la señal óptica deben ser considerados en la transmisión por la fibra. Estos efectos pueden ser minimizados mediante el control de las variables, tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda y los niveles de potencia del láser. En un enlace óptico se usan amplificadores ópticos para darle ganancia a la señal".
5. "Un preamplificador refuerza la señal antes de que entre en un extremo del sistema".
6. "Inmediatamente viene la separación de las señales recibidas. En el lado del receptor, tales señales multiplexadas deben ser separadas en lambdas (longitudes de onda) individuales.

Aunque esta tarea parece ser simplemente el opuesto de la combinación de señales, en la actualidad es técnicamente más difícil”.

7. “Finalmente está la recepción de señales. La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector y cada lambda individual es mapeada según el tipo de salida requerido. Si el cliente tiene servicio de fibra óptica, sus equipos deben contar con interfaces para recibir la señal”.

## 1.2 DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN - PMD

La PMD es un problema significativo encontrado en un gran número de redes ópticas, con especial incidencia en las redes de alta velocidad (10 Gbps) y larga distancia, PMD produce ensanchamientos de los pulsos ópticos transmitidos por una fibra óptica, lo que provoca interferencia entre símbolos, por lo tanto, un aumento de la tasa de bit erróneo (BER) [8]. La PMD ocurre cuando dos polarizaciones diferentes de una señal de luz transmitida, se propagan con una diferencia de velocidad a través de la fibra como se muestra en la Figura 1. 1 [1].

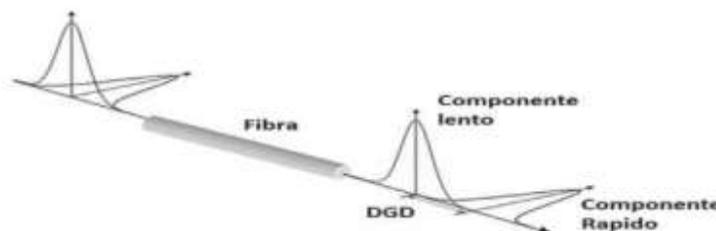


Figura 1. 1 Representación de la PMD [1]

El principal problema, es que el núcleo de la fibra no es perfectamente circular, lo que origina dispersión a un grado tal que puede dejar a la señal en un estado que difícilmente pueda ser leído. Cuando la luz viaja en una fibra mono-modo hacia el receptor, tiene dos modos de polarización que viajan en dos ejes, y se mueven formando un ángulo recto uno del otro. En una fibra ideal las dos polarizaciones se propagarían a la misma velocidad de fase, pero en realidad cualquier asimetría, curvatura o torsión hace que las dos polarizaciones se propaguen a diferente velocidad [9]; este efecto puede ser causado por problemas relacionados con la fabricación como imperfecciones en la fibra o asimetrías geométricas, por estrés mecánico, cambios de temperatura, movimientos de la fibra o también por los materiales mismos como el efecto de birrefringencia [1]. Esta propiedad se da por una pequeña diferencia en el índice de refracción en una pareja particular de estados de polarización ortogonal, es decir, que la velocidad de la luz depende de la ruta que toma a lo largo de la fibra [9].

### 1.2.1 BIRREFRINGENCIA

La Birrefringencia o doble refracción, es una propiedad de los materiales transparentes o molecularmente ordenados, de desdoblar un rayo de luz incidente de dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí, provocado por la existencia de la dependencia del índice de refracción con respecto a la orientación. La primera de las dos direcciones sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario, la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario; ambas ondas están polarizadas perpendicularmente. Muchos sólidos transparentes son ópticamente isotrópicos, esto quiere decir que su índice de refracción es igual en todas las direcciones a través de la estructura cristalina. Por otro lado, existen los sólidos en donde su comportamiento óptico no es uniforme, estos se les denomina materiales anisótropos [10].

El término anisotropía se refiere a la no uniformidad espacial de la distribución de sus propiedades, lo que resulta en diferentes valores obtenidos en mediciones en diferentes partes del mismo. Los materiales anisótropos que exhiben diferencias de su índice de refracción con respecto a la orientación del eje óptico del cristal, se denominan Birrefringentes [10].

La birrefringencia está cuantificada por la relación [9]:

$$\Delta n = n_e - n_o \quad 1.1$$

Donde  $n_o$  es el índice de refracción del rayo ordinario y  $n_e$  es el índice de refracción del rayo extraordinario [9].

Esta expresión se vuelve verdadera en cualquier parte o fragmento de un cristal anisótropo, con excepción de la luz propagada a través del eje óptico del cristal, porque el índice de refracción puede variar, el valor absoluto de esta diferencia puede determinar el total de la cantidad de birrefringencia, pero el signo puede ser negativo o positivo. La determinación del signo de la birrefringencia, se hace por métodos analíticos. La birrefringencia no es un valor fijo, este puede variar con la orientación del cristal, relativa con el ángulo de incidencia de la iluminación [10].

Aunque la birrefringencia es una propiedad de muchos cristales anisótropos, como la calcita y el cuarzo, también puede surgir de otros factores como el orden estructural, estrés físico, deformación, la tensión, entre otros. La birrefringencia intrínseca, es el término usado para describir lo que ocurre naturalmente a los materiales que poseen asimetría en su índice de refracción, dependiente de la dirección [10].



Figura 1. 2 Sección transversal de fibra ópticas ilustrando las causas de birrefringencia [9]

En contraste a la fibra ideal, mostrado en lado izquierdo de la Figura 1. 2, una fibra real exhibe diferentes tipos de imperfecciones; de derecha a izquierda: torsión o curvatura, impurezas en la

fibra, y asimetría de la fibra. Las imperfecciones son parte inherente del proceso de fabricación de la fibra y son en parte causado por las condiciones ambientales y la calidad del despliegue ó instalación de la fibra. La simetría en la configuración de las fibras es casi constante en el tiempo lo cual causa una PMD constante. La curvatura y tensión de la fibra puede variar en el tiempo debido a los cambios de la temperatura y aún mostrar fluctuaciones diurnas (Día/Noche) de la torsión y causar variaciones de la PMD. Las vibraciones pueden causar cambios dinámicos en la curvatura, y como resultado variar la PMD en fibras que se instalan cerca de líneas de un tren, asimismo las fibras aéreas pueden mostrar un cambio en la tensión y curvatura debido al movimiento causado por el viento [9].

Todos estos efectos contribuyen a que la PMD no sea constante, por lo que el máximo PMD que puede ocurrir, solamente puede ser aproximado. Con respecto a la PMD, es importante entender que la causa real de la degradación de la señal es el retardo diferencial de grupo (también denominado la PMD instantánea), y que el término PMD es realmente la media del valor de la DGD (Differential Group Delay) [11], a una longitud de onda y en un tiempo determinado. Cuando la luz es acoplada en una fibra, toma diferentes rutas conforme viaja a través de ella, la Figura 1. 3 muestra como el retardo diferencial de grupo, es la diferencia en el tiempo de los componentes del pulso de luz que viaja a través de la fibra dependiendo de las rutas que tomen [9].

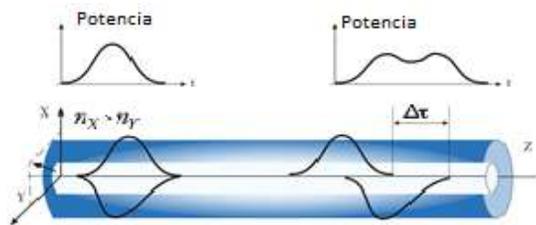


Figura 1. 3 Esquema de propagación de dos modos de polarización en una fibra óptica birrefringente [11]

Típicamente, la situación representada en la Figura 1. 3, se produce cuando el pulso óptico de entrada está polarizado entre el eje X e Y que le da un componente de polarización a lo largo de ambos ejes x (en la Figura 1. 3 se polariza a 45 grados con respecto a los ejes X e Y) [11]. En el punto final de la fibra se presentará una diferencia de tiempo de las dos partes del pulso de luz, a esto se denomina el retraso diferencial de grupo (DGD), es proporcional a la raíz cuadrada de la distancia de propagación L, como lo muestra la ecuación 1.2 [1]. En un tipo especial de fibra, conocido como PMF-Polarization Maintainig Fiber, las diferentes partes de los pulsos de luz viajan por diferentes rutas, pero no cambian esta ruta durante todo su recorrido por la fibra. Este tipo de fibra puede ser fácilmente compensada en su DGD (PMD), mediante el uso de un polarizador para filtrar una parte del pulso de luz, ya sea la parte marcada con X o la otra parte representada en la Figura 1. 4 (La Figura 1. 4 representa un tramo de fibra siempre y cuando la fibra fuera PMF). Una fibra de telecomunicaciones real puede representarse como una serie de elementos de fibras birrefringentes del tipo ilustrado en la Figura 1. 4, concatenados con una orientación aleatoria de los ejes [9].

$$\Delta_T = D_{PMD} \sqrt{L} \quad 1.2$$

Donde  $D_{PMD}$  es el parámetro PMD de la fibra, típicamente medido en  $ps/\sqrt{km}$ , y es una medida de la intensidad y frecuencia de las imperfecciones (Tabla 1. 1) [1].

	10G	40G	100G
Reducción del Intervalo de Bit	100ps	25ps	10ps
Aumento BW Eléctrico	1	4	10
Ocupación del Espectro Óptico	1	~4	~10
Tolerancia CD (ps/nm)	1	1/16	1/100
Tolerancia PMD (ps)	1	¼	1/10
Margen de Ruido	0 dB	-6dB	-10dB

Tabla 1. 1 Restricciones de transmisión vs tasas de línea

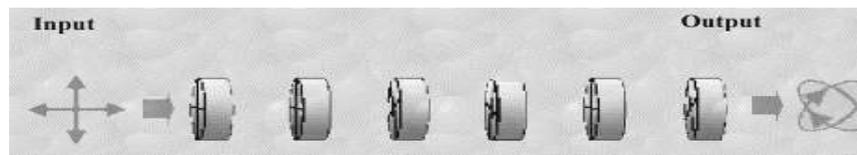


Figura 1. 4 Concatenación aleatoria de elementos birrefringentes como representación de una fibra [9]

PMD es un factor restrictivo y limitante, para redes DWDM a partir de 10Gbps, y puede limitar la distancia a la cual la luz puede ser transmitida por una fibra. El impacto de PMD también depende de la velocidad de la línea de la señal transmitida, ya que la cantidad de errores de bit, es directamente influenciada por la cantidad de PMD presente en la fibra óptica, por lo tanto, es importante reducir la tasa de símbolos usando técnicas de modulación avanzadas [1].

### 1.3 TÉCNICAS DE MODULACIÓN

Debido a que los regímenes binarios en comunicaciones ópticas, han estado históricamente limitados por la velocidad de conmutación de los componentes electrónicos, es de gran importancia, tener en cuenta las características del hardware utilizado en la modulación y detección de las señales durante la etapa de diseño de un sistema de comunicaciones ópticas. Existen tres tecnologías fundamentales empleadas en el diseño de moduladores ópticos: láseres de modulación directa (Directly Modulated Lasers, DMLs); moduladores basados en mecanismos de electroabsorción (Electro-Absortion Modulators, EAMs) y moduladores Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Modulators, MZIs) [12].

#### 1.3.1 MODULADOR MACH-ZEHNDER-MZM

Los moduladores Mach Zehnder trabajan bajo el principio de interferencia, en la Figura 1. 5 se muestra la estructura del modulador: la luz que entra al dispositivo es dividida en dos caminos en la

entrada del acoplador; uno de estos caminos tiene un modulador de fase que hace que los campos ópticos adquieran alguna fase diferencial relativa con respecto al otro, controlado por la aplicación de voltaje  $V_{1,2}$ . Estos dos campos interfieren en un acoplador de salida. Teniendo lugar así la modulación de la intensidad de la fuente láser [13].

Los MZIs se implementan comúnmente en Niobato de Litio (LiNbO<sub>3</sub>), también pueden encontrarse moduladores fabricados en Arsenuro de Galio (GaAs) o en Fosfuro de Indio (InP). Los MZIs, sobre todo los que están basados en LiNbO<sub>3</sub>, muestran características de modulación independientes de la longitud de onda y unas pérdidas de inserción más bajas que los EAMs (alrededor de 5 dB). Como contrapartida, trabajan a mayor tensión que los EAMs (hasta 6 V), lo que hace necesario el uso de amplificadores de banda ancha, complejos de fabricar para regímenes binarios superiores a 10 Gb/s [13].

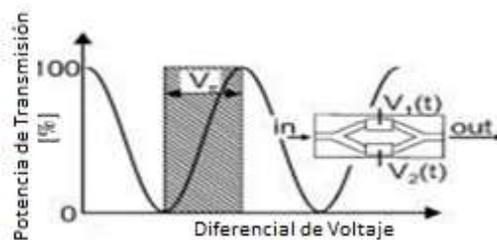


Figura 1. 5 Función de transmisión MZI [13]

### 1.3.2 INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER- MZI

El Interferómetro de Mach-Zehnder (MZI, *Mach-Zehnder Interferometer*), es un dispositivo particularmente simple que demuestra la interferencia por división de amplitud. Se trata de un dispositivo óptico integrado, cuyo funcionamiento se basa en un fenómeno de interferencia de ondas, controlado por una serie de señales de control. Dependiendo de la fase relativa adquirida por el haz a lo largo de los dos caminos, el segundo beam splitter reflejará el haz con una eficiencia entre el 0 y el 100%. Entre sus múltiples aplicaciones, podemos enumerar las siguientes: conmutación óptica, conversión de longitud de onda, funciones de lógica digital, regeneración óptica de señales, entre muchas otras. Una mirada rápida de su composición es posible apreciarla en la Figura 1. 6 [14].

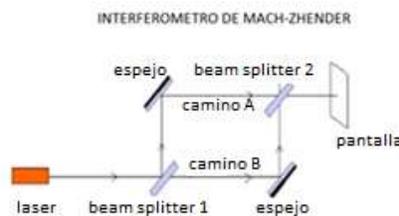


Figura 1. 6 Esquemático básico de un MZI [14]

### 1.3.3 FUNCIONAMIENTO DEL MZI

La estructura básica de un interferómetro de MZI, consta de dos acopladores direccionales de 3dB (un splitter y un combinador con  $\alpha = 0.5$ ) interconectados mediante dos caminos de diferentes longitudes, siendo la diferencia  $\Delta l$ . La señal introducida por una de las entradas se divide en dos replicas iguales al atravesar el splitter. Debido a la diferencia de caminos se introduce un desfase en una de las réplicas. Dependiendo de la longitud de onda de la señal se tendrá una interferencia constructiva o destructiva a la salida al combinarse las señales. A continuación se hace una explicación paso por paso de su funcionamiento [14].

El primer beamsplitter (BS) del MZI, es plateado en su parte superior. Para un fotón que incide en este BS desde el camino superior (Figura 1. 7 a.), la componente reflejada de su estado de superposición presentara un desfase de  $180^\circ$ , comparado con el haz incidente. Esto es debido a la interface aire-vidrio, que es el cambio de bajo a alto índice de refracción. La componente de transmisión no sufrirá cambio en su fase. Para un fotón incidente desde el camino inferior (Figura 1. 7 b) sus componentes de transmisión y de reflexión no sufrirán cambio de fase [14].

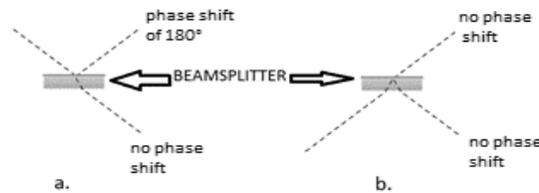


Figura 1. 7 Caminos posibles de entrada de un MZI [14]

Si  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  y  $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  representan los caminos superior e inferior respectivamente, se supone el estado inicial del fotón en  $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  camino inferior (Figura 1. 7). Para el primer BS puede ser representado como una matriz de  $2 \times 2$  [14].

$$BS_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\pi} & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad 1.3$$

El haz inferior no presenta cambio en su fase. Así, el BS crea un estado de superposición para el fotón Figura 1. 8 [14].

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \quad 1.4$$

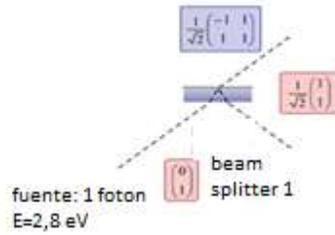


Figura 1. 8 Incidencia fotón camino inferior sobre el primer [14]

Es incorrecto afirmar, que esta superposición implica que el fotón se divide en dos fotones separados, cada uno de ellos con la mitad de la intensidad del fotón original. La intensidad está dada por los modulados al cuadrado de los estados cuánticos, y así no contienen información de la fase. Lo que se observa es la interferencia entre dos caminos, lo cual solo es posible debido a la fase relativa entre ellos [14].

El segundo BS es plateado en su parte inferior. Este BS es representado matemáticamente por [14]:

$$BS_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad 1.5$$

Después de pasar a través de todo el interferómetro, es claro que el estado del fotón cambia de fase de 180° a través de las reflexiones de los espejos, y se obvia en la representación matemática para simplificar expresiones [14].

$$BS_2 \times BS_1 \times |in\rangle \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad 1.6$$

El cambio de fase en el camino inferior puede ser matemáticamente representado como  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Phi} \end{pmatrix}$ . Así, el cambio en la fase da lugar a un nuevo estado de superposición  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Phi} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  [14].

El estado del protón después del paso a través de todo el interferómetro, pero antes de la detección es [14]:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\Phi} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + e^{i\Phi} \\ 1 - e^{i\Phi} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left( (1 + e^{i\Phi}) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + (1 - e^{i\Phi}) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \quad 1.7$$

Asumiendo que la diferencia de longitud entre los caminos que conectan los dos acopladores, es  $\Delta L$  y que únicamente en el puerto de entrada superior del primer BS, hay señal presente, se muestra que la función de transferencia de MZI está dado por [14]:

$$\begin{pmatrix} T_{11}(f) \\ T_{12}(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sen}^2 \left( \beta * \frac{\Delta L}{2} \right) \\ \text{cos}^2 \left( \beta * \frac{\Delta L}{2} \right) \end{pmatrix} \quad 1.8$$

Siendo  $\beta * \Delta L$  la diferencia de fase entre el fotón que se propaga por el camino inferior con respecto al fotón que se propaga por el camino superior. Consecuentemente, la diferencia de longitud entre los dos brazos del MZI, es el parámetro que caracteriza la función de transferencia del dispositivo [14].

#### 1.4 FORMATOS DE MODULACIÓN

La modulación, es el proceso mediante el cual se modifican algunos de los parámetros que caracterizan la onda, en función de la señal que se desea transmitir. A la onda que se le modifican los parámetros, se denomina portadora, y a la que contiene la información moduladora. En la onda portadora se modifican esencialmente cuatro parámetros distintos: amplitud, frecuencia, fase y estado de polarización. Para los regímenes binarios, se nombran las modulaciones de acuerdo al parámetro que se modifica; Modulación en Amplitud (ASK, Amplitude Shift Keying), Modulación en Frecuencia (FSK, *Frecuency Shift Keying*), Modulación en Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) y Modulación del Estado de Polarización (PolSK, *Polarization Shift Keying*) [15].

La adecuada selección de un formato de modulación, permite combatir los efectos lineales y no lineales que se presentan en el canal de comunicación, además incrementar el régimen binario del sistema, la longitud de los tramos abarcados entre amplificadores o regeneradores, el OSNR global del sistema y en general asegurar una correcta recepción de la señal óptica [15].

Además de estos formatos de modulación, existen variaciones de ellos mismos que explotan fortalezas, logrando las mejoras esperadas. La Figura 1. 9, presenta los formatos de modulación y algunas de sus derivaciones [16].

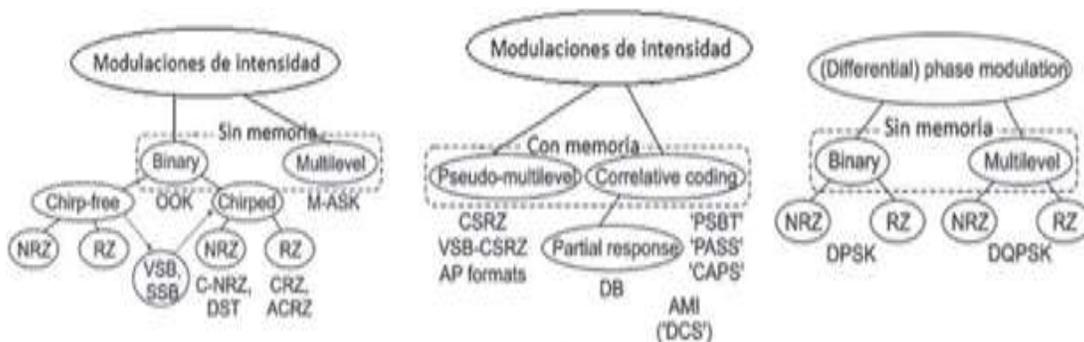


Figura 1. 9 Algunos formatos de modulación y sus derivaciones [16]

#### 1.4.1 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE – PSK

PSK, es un esquema de modulación que modifica la fase de la onda óptica entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  y  $0$  y  $\pi$ , en lugar de la intensidad de la luz del láser, distribuyendo la potencia óptica por igual, esta potencia está presente en todo el tiempo del bit. En teoría, este puede ser representado como una intensidad constante u Onda Continua (CW, *Continuous Wave*), como el uno y el cero son representados por dos diferentes fases de la luz. La dificultad de este formato radica en el lado de la demodulación, que requiere un demodulador que pueda detectar fases absolutas de la onda de luz entrante, estos dispositivos son conocidos como detectores coherentes, y hacen uso de una portadora de referencia con la que comparan la señal recibida [15]. El hecho de mantener constante la amplitud independiente de la cadena de bits que se transmita, representa una ventaja con respecto a los formatos de modulación en amplitud, ya que la mayoría de los efectos no lineales producidos como consecuencia de cambios en la amplitud en la señal son eliminados [13].

Por otra parte, la demodulación de señales PSK exige una elevada estabilidad en la fase de la portadora óptica, un pequeño cambio en el índice de refracción de la fibra óptica (FO), puede modificar la fase de la portadora en  $\pi$  radianes, ocasionando que el receptor genere una cadena de bits inversa, a la que originalmente se envió por la FO [13] [15].

Estas son algunas de las limitaciones que llevan a abandonar la PSK en favor de sus variaciones, entre las cuales las más extendidas son DPSK, DQPSK, PDPSK [15].

#### 1.4.2 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DIFERENCIAL DE FASE - DPSK

DPSK, consiste en un formato PSK diferencialmente, controlado por un flujo de bits en el esquema diferencial, los ceros representan  $180^\circ$  de cambio en la fase y los unos no representan cambios en absoluto, cada pulso óptico puede ocupar el slot que corresponde completamente (NRZ-DPSK), o parcialmente (RZ-DPSK). El formato DPSK también ha demostrado ser muy robusto frente a las no-linealidades del canal óptico, por lo que no es sorprendente que muchos de los enlaces DWM de larga distancia (LH, *Long Haul*) establecidos recientemente con regímenes binarios de 10 Gbps y 40 Gbps por canal, estén basados en este formato de modulación [13] [15].

El formato de modulación DPSK presenta mayor solides que el formato OOK, frente al filtrado de banda estrecha, especialmente cuando se emplea detección balanceada de señal. Por otro lado, el formato DPSK posee un ancho espectral mayor a los 50 GHz lo que imposibilita su implementación en redes ópticas de tipo DWDM. Sus derivaciones como lo son DQPSK y Partial-DPSK, poseen un ancho espectral de 50 GHz y es importante destacar el comportamiento superior que presenta frente a degradaciones de primer orden, como son la CD y la PMD [15].

### 1.4.2.1 TRANSMISOR DPSK

El transmisor está compuesto por un láser que emite luz de forma continua, seguido por uno o dos moduladores externos. La modulación en fase puede hacerse mediante un Modulador de Fase (PM, *Phase Modulator*) o mediante un MZI [17].

Un PM únicamente modula la fase de la portadora, permaneciendo su intensidad sin ninguna alteración. Dado que la modulación de fase no se produce inmediatamente, un PM introduce (inevitablemente) cierto chirp en las transmisiones entre bits [17].

Por otra parte, cuando se usa un MZI en lugar de un PM para generar la DPSK, el modulador se polariza en el punto de transmisión nula y se excita con una tensión de amplitud doble a la aplicada en el caso de señales OOK. Debido a que la fase del campo óptico es de signo opuesto a izquierda y derecha de un mínimo de la curva de transmisión del MZI (Figura 1. 10), dos máximos contiguos de dicha curva tendrán fase opuesta [18].

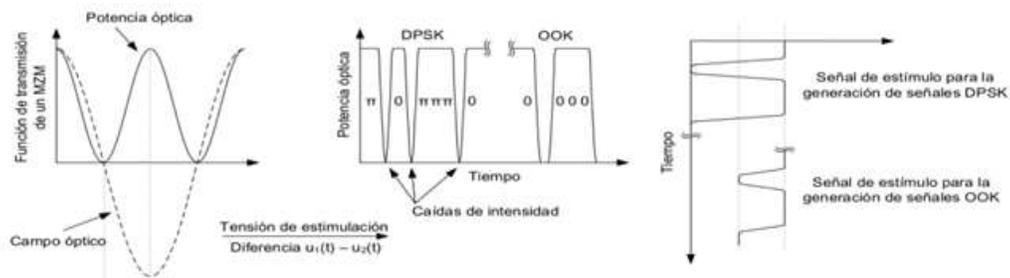


Figura 1. 10 Generación de señales moduladas en fase mediante un MZI [18]

Cuando se utiliza un MZI para generar la señal modulada en fase, un ancho de banda insuficiente en la señal que estimula el dispositivo sólo afecta a las caídas en la intensidad de la señal modulada, permaneciendo inalterados los saltos de  $\pi$  radianes en la fase de dicha señal. Pruebas de laboratorio demuestran que en el caso de señales RZ- DPSK, se produce un impacto mínimo en la señal modulada, cuando se utilizan MZIs para su generación y el ancho de banda de la señal con la que se estimula el modulador, es insuficiente [18].

La Figura 1. 11 muestra la estructura de un transmisor DPSK, en el cual dos MZI de LiNbO<sub>3</sub> son usados. Los transmisores ópticos de DPSK, consisten de un estrecho haz de láser para generar longitudes de onda. Los pulsos son alimentados al segundo MZI, mediante el cual estos pulsos son modulados por el pre codificador binario de datos, para generar señales ópticas del tipo RZ-DPSK. Los pulsos de datos eléctricos son diferencialmente pre-codificados en un pre-codificador, usando un esquema de codificación XOR [19].

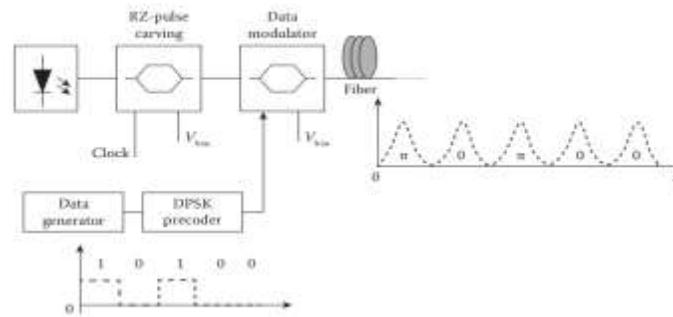


Figura 1. 11 Transmisor óptico DPSK con un pulse carver RZ [19]

Sin el pulso carver, la estructura mostrada en la Figura 1. 11 sería un transmisor óptico NRZ-DPSK.

En aplicaciones ópticas, los datos eléctricos “1” son representados por un cambio de la fase de  $\pi$  entre los bits de datos consecutivos [19].

Un transmisor RZ-DPSK está compuesto por: una fuente óptica, un pulso carver, un modulador de datos, un codificador diferencial de datos y un acoplador de canal ( Figura 1. 12) [19].

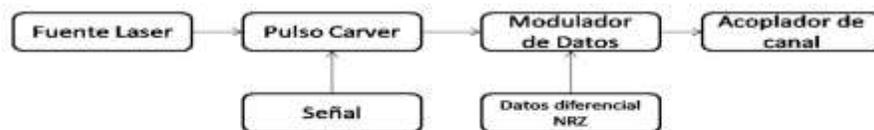


Figura 1. 12 Diagrama de bloques de un transmisor RZ-DPSK [19]

#### 1.4.2.2 EL RECEPTOR DPSK

En un receptor DPSK de detección directa, el MZI hace que dos bits consecutivos interfieran entre sí; esta interferencia conduce a la presencia o ausencia de potencia en la salida constructiva del MZI, si los dos bits citados interfieren en fase o en oposición de fase, respectivamente. Por lo tanto, un bit dado de una cadena de bits en una señal DPSK, actúa como referencia de fase para demodular el bit siguiente ( Figura 1. 13) [13].

En primer lugar, en el transmisor la señal óptica atraviesa un Interferómetro Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer, MZI), que introduce un retraso en uno de sus brazos. El retraso diferencial que introduce entre sus dos brazos el MZI, es igual a un periodo de bit de la señal óptica de entrada. Este pre-procesado óptico es necesario en receptores basados en detección directa, ya que la foto-detección de señales es insensible a la fase de la señal recibida, un detector únicamente convierte energía óptica en energía eléctrica [13].

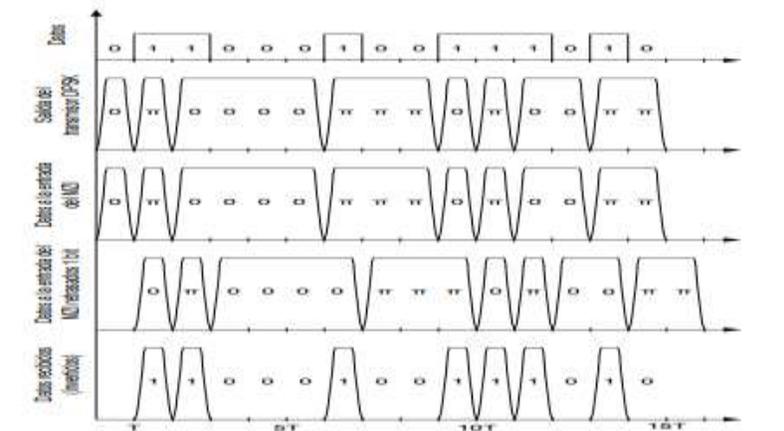


Figura 1. 13 Detección directa de una señal DPSK [13]

En la salida del MZI, se muestra que en el puerto constructivo se tiene una señal dúo-binaria mientras que en el puerto destructivo se tiene una señal AMI, tal como se aprecia en la Figura 1. 14. Una operación de retraso de un bit y suma (one-bit delay and-add), realizada sobre una señal DPSK produce una señal dúo-binaria, mientras en una operación de retraso de un bit y diferencia (one-bit delay-and subtract), produce una señal AMI [13] [18]. Ambas operaciones se pueden realizar con un MZI, cuyo retraso relativo entre sus dos brazos está establecido a un periodo de bit de la señal recibida, ya que el puerto constructivo implementa una función retraso-y-suma, mientras que el puerto destructivo implementa una función retraso-y-diferencia [20].

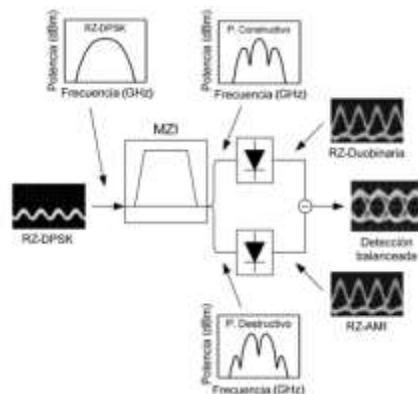


Figura 1. 14 Receptor DPSK típico [20]

### 1.4.3 MODULACIÓN PARCIAL POR DESPLAZAMIENTO DIFERENCIAL DE FASE – PDPSK

Como se ha expuesto antes, el demodulador DPSK está normalmente basado en un MZI cuyo retraso relativo entre sus dos brazos está fijado a un periodo de bit de la señal recibida. La idea del formato de modulación Parcial DPSK es reducir el retraso relativo entre los dos brazos del MZI a un valor

inferior al periodo de bit de la señal recibida y así contrarrestar la degradación que ha sufrido la señal al atravesar el enlace óptico, mejorando la sensibilidad del receptor. [21] [13] [22] [23]

En la salida del demulador PDPSK, un solo bit interferirá con un bit adyacente y con el mismo. La auto interacción parcial de bit que conduce a una interferencia constructiva determinista constante en el receptor, provee un buffer entre bit que mejora en última instancia la tolerancia a la Interferencia Inter-Simbólica (ISI, *Inter-Symbol Interference*). La tolerancia a la ISI proporcionada por la interferencia constructiva citada es menos eficiente en presencia del fenómeno PMD. Este fenómeno origina un retraso relativo entre los dos estado de polarización de la luz que se propaga por la fibra, haciendo que la localización temporal de la interferencia constructiva varíe con el tiempo y que el ISI sea más intenso perdiéndose el control sobre esta [13] [22] [23].

El espectro de transmisión de una señal RZ-PDPSK, se puede observar en la Figura 1. 15 [21].

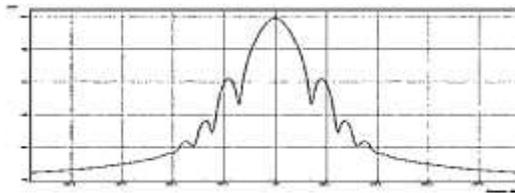


Figura 1. 15 Espectro de señal RZ-PDPSK [21]

Normalmente, se esperaría que un desfase de bit provoque una mejora en el rendimiento, esto es ciertamente el caso de un canal sin dispersión o degradación por filtrado. Un receptor PDPSK puede mejorar el rendimiento cuando la señal transmitida es de alta tasa de bit sobre un canal, que emplea filtros ópticos de banda estrecha, o si la señal experimenta dispersión significativa [22] [23].

Una vez que el receptor balanceado DPSK y PDPSK han sido presentados, puede exponerse el motivo de la mejora de 3 dB en el OSNR, que el formato DPSK con detección balanceada, presenta sobre el formato OOK. Cuando una señal DPSK alcanza el receptor y atraviesa el MZI, cuyo retardo diferencial ha sido previamente establecido a un periodo de bit de la señal óptica transmitida, una de las salidas del interferómetro, muestra energía debida a la propia señal DPSK-PDPSK y al ruido generado en el canal de comunicación, mientras que la otra salida del interferómetro muestra energía debida únicamente al ruido generado en el canal de comunicación [23].

En el detector balanceado, la potencia correspondiente al ruido del canal se resta de la potencia correspondiente a la señal óptica y al ruido del canal, reduciendo la cantidad de ruido de la señal recibida y dando lugar a la mencionada mejora de 3 dB en el OSNR, sobre los formatos OOK [13]. Ver en la Figura 1. 16 [23].

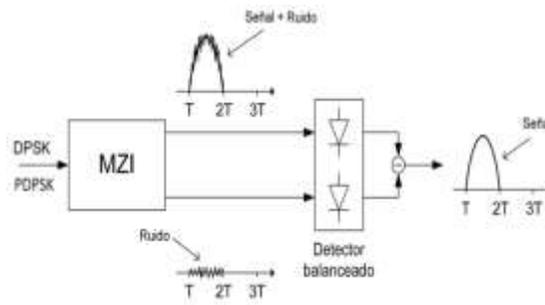


Figura 1. 16 Mejora de 3 dB en la detección balanceada de señales DPSK y PDPSK con respecto a señales OOK [13]

A partir de los resultados encontrados en [23], se concluye que el mejor Delay a utilizar en el MZI es de 65% del periodo de bit.

#### 1.4.4 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO POR CUADRATURA DIFERENCIAL DE FASE-DQPSK

DQPSK es una técnica de modulación digital, en la cual la información de símbolos se codifica como el cambio de fase de un periodo de símbolo al siguiente, en lugar de una fase absoluta como en QPSK. En este caso, el receptor tiene que detectar cambios de fase y no el valor absoluto de la fase, esto se observa en la Figura 1. 17, lo que evita la necesidad de un portador local sincronizado y reduce la complejidad del sistema [24].

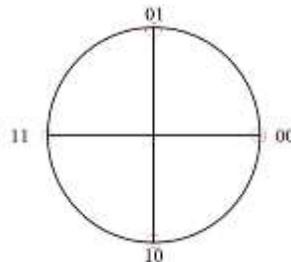


Figura 1. 17 Cambios de fase modulación DQPSK

De la misma forma que el cambio en DPSK está relacionado con el estado de la última fase transmitida, también lo está para DQPSK, excepto que hay cuatro fases de cambio posibles permitidos [24].

Para entender como es una señal DQPSK, se muestra la forma en que se define la ecuación de QPSK. En este caso, es una señal similar con la particularidad de que los cambios de fase no se hacen con una referencia absoluta sino con la fase anterior, pero las transiciones de estado son similares en cuanto a los puntos de decisión [24]:

$$S_i(t) = A \cos(2\pi f t_c + \theta_i), \quad 1.9 \quad 0 \leq t \leq T_i, \quad i = 1,2,3,4$$

$$\theta_i = \frac{(2i-1)\pi}{4} \quad 1. 10$$

Donde A es la amplitud de la señal que se mantiene constante,  $f_c$  es la frecuencia de la portadora, t es el tiempo,  $T_1$  es el intervalo de tiempo de cada bit y  $\Theta_i$  es la fase. La frecuencia de la portadora debe ser elegida como un múltiplo de la tasa de símbolo y las fases posibles son  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, -\frac{\pi}{2}$  [24].

En la Tabla 1. 2 se muestra la manera en que se hacen las transiciones de estado para el esquema DQPSK [24]:

**Bits de información    Cambio de fase**

<b>11</b>	$\pi$
<b>01</b>	$\frac{\pi}{2}$
<b>00</b>	0
<b>10</b>	$-\frac{\pi}{2}$

Tabla 1. 2 Transiciones de estado de acuerdo a los dubits

La probabilidad de error, es una expectativa teórica (matemática) de la tasa de error de bit para un sistema determinado. Es función de la relación de potencia de la portadora a ruido y el número de niveles posibles. Para DQPSK la probabilidad de error está dada por [24]:

$$P_s = \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\exp\left\{-\frac{E}{N_0}\left[1-\cos\frac{\pi}{4}\cos x\right]\right\}}{1-\cos\frac{\pi}{4}\cos x} dx \quad 1. 11$$

Donde la integral, es la función Q, la cual a su vez es un integral Gaussiana que decrece monótonicamente en función de “x”, también se le llama el complemento de la función de error, es decir, es el área debajo de la curva de un medio cero y esta inversamente relacionada con  $\frac{Eb}{No}$ , que la relación de energía promedio con la densidad espectral del ruido [24].

La probabilidad de error de bit, se puede aproximar por la siguiente ecuación [24]:

$$P_s \approx Q\left(\sqrt{\frac{4Eb}{No} \sin \frac{\pi}{4\sqrt{2}}}\right) \quad 1. 12$$

Donde Q, es la función Q, está inversamente relacionada con  $\frac{Eb}{No}$ , que es la relación de energía promedio de bit con la densidad espectral del ruido. Este es de 2 a 3 dB inferior a la forma coherente de QPSK, que se encuentra graficada en la Figura 1. 18 [24]:

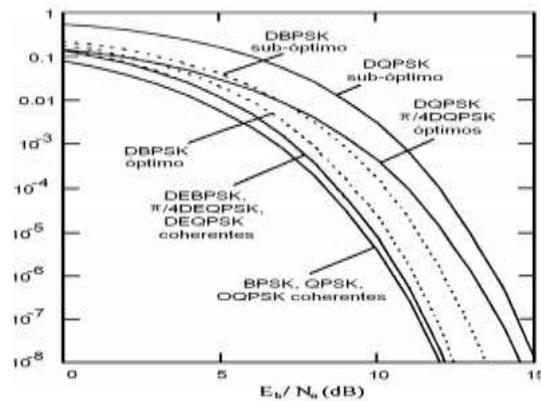


Figura 1. 18 Probabilidad de error para DQPSK. [25]

En la Figura 1. 18 se observa que para  $\frac{E_b}{N_0}$  de 10 dB se tiene aproximadamente un BER de  $10^{-3}$ , y es muy similar a la que tiene  $\frac{\pi}{4DQPSK}$ , ambas operando en modo óptimo [24].

La densidad espectral de potencia (PSD), se define igual que para el esquema de modulación QPSK, ya que la secuencia de datos es muy similar a la original y se define a partir de [24]:

$$\varphi_s(f) = A^2 2T_b \left( \frac{\sin \pi f 2T_b}{\pi f 2T_b} \right)^2 \quad 1.13$$

Donde A es la amplitud,  $T_b$  es el periodo del bit y f es la frecuencia central. Se observa una función Sampling (respuesta a un impulso) que en este caso esta elevada al cuadrado, ya que nos interesa la potencia [24].

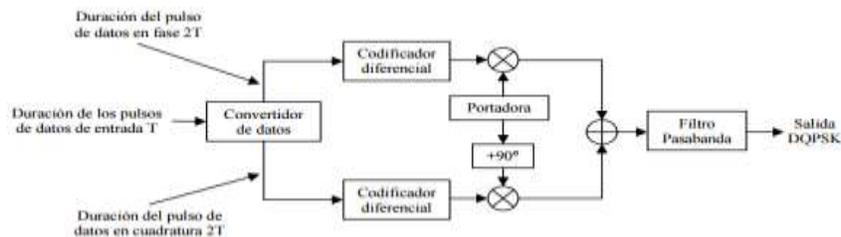


Figura 1. 19 Modulador DQPSK [25]

El modulador de la Figura 1. 19, consta de un convertidor de datos en fase y cuadratura (data converter), seguido de los codificadores diferenciales, que su función es encriptar; con las transiciones de estado que tenga la señal, después se aplica el heterodinaje a ambas señales y se suman señales; al hacer esto, se introduce ruido (frecuencias no deseadas) que será removido con el filtro pasa banda [24].

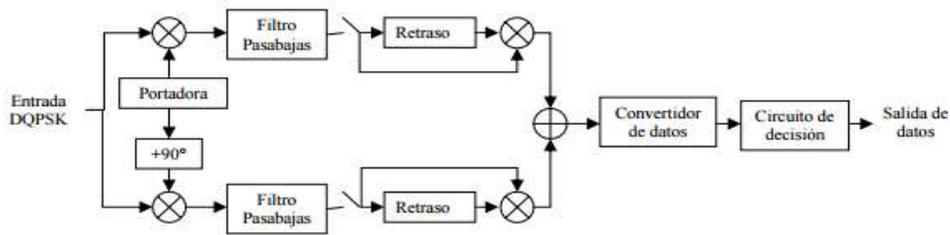


Figura 1. 20 Demodulador DQPSK [25]

La demodulación de señales DQPSK, puede ser lograda con un conjunto de circuitos más simple, que para demodular PSK o QPSK, porque no se necesita referencia de fase absoluta. La referencia de fase es tomada de la fase del último bit recibido. Con 2 bits se determina la fase de la portadora; este puede tomar cuatro estados separados de 90 grados. Cada bit desplaza la fase de la portadora una cantidad determinada, con la referencia al estado previo [24].

El demodulador de la Figura 1. 20 tiene a su entrada un convertidor de bajada, el cual separa ambas señales (fase y cuadratura), pasándolas por un filtro pasa bajas; luego con el retardo de tamaño, se lleva a cabo la demodulación diferencial que se está comparando con la fase anterior; luego ambas señales se suman y pasan al convertidor de datos, el circuito de decisión se encarga de decidir el dubit correspondiente a cada símbolo [24].

#### 1.4.5 BACK-TO-BACK

Cuando se va a trabajar con un sistema de simulaciones, es importante verificar las señales que se van a generar e inyectar al sistema, para esto, es necesario que estas señales sean comparadas con la señal teórica.

La implementación de una simulación Back-to-Back (B2B), es importante ya que esta permite comprobar que la señal que genera el sistema y va a ser inyectada al medio de transmisión, sea similar a la señal teórica.

Para este proyecto específicamente, se va a verificar la señal que se va a inyectar al medio de transmisión, por medio de una comparación del diagrama de ojo teórico con el obtenido en la simulación B2B, para cada una de las modulaciones a trabajar. La simulación B2B se va a realizar empleando el software de simulación OptSim® de Rsof.

##### 1.4.5.1 BACK-TO-BACK RZ-PDPSK

En la Figura 1. 21, se muestra el transmisor y receptor RZ-PDPSK en el simulador Optsim, para poder realizar esta simulación no se consideran ni pérdidas ni distorsiones, las cuales están implícitas en el medio de transmisión (fibra óptica).

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

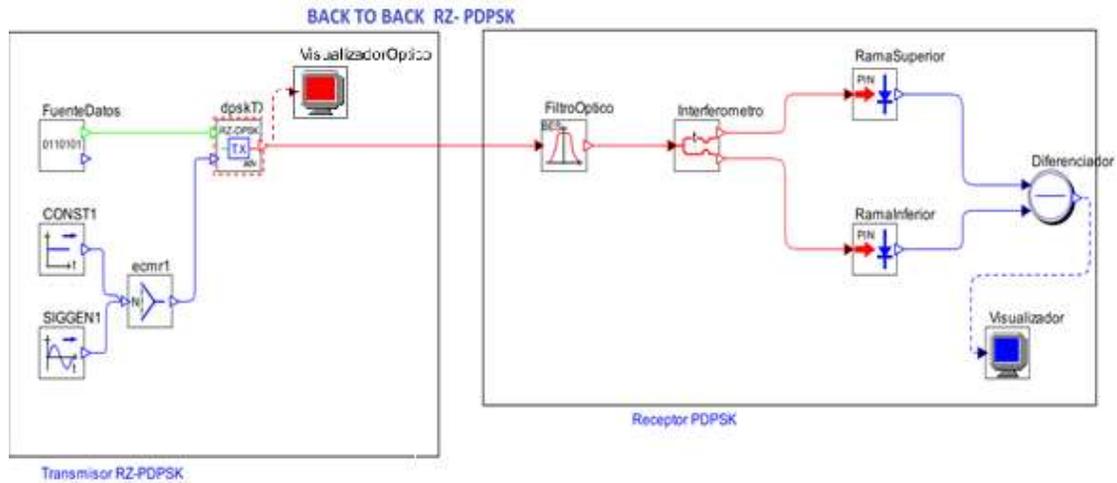


Figura 1. 21 Transmisor y receptor RZ-PDPSK

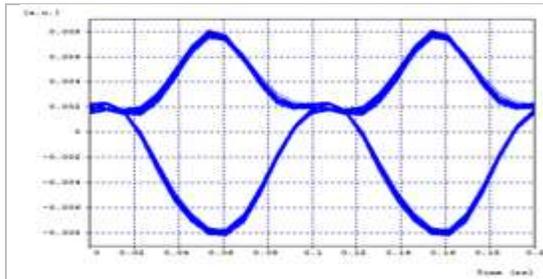


Figura 1. 22 Diagrama del ojo salida del sistema RZ-PDPSK-65%

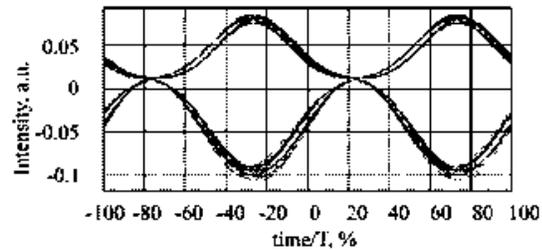


Figura 1. 23 Diagrama del ojo teórico salida del sistema RZ-PDPSK [26]

Se puede observar que el diagrama de ojo a la salida del sistema B2B en el visualizador eléctrico mostrado en la Figura 1. 22, es similar al diagrama de ojo teórico de la Figura 1. 23, dando garantía que la señal que se está generando en PDPSK, es una señal válida.

En la Figura 1. 24 se puede verificar el espectro en frecuencia, que no existen distorsiones ocasionadas por mala generación de la señal.

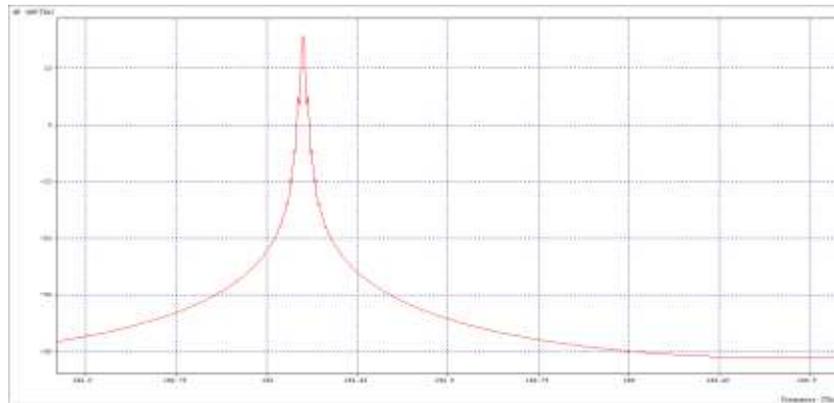


Figura 1. 24 Espectro B2B en frecuencia

#### 1.4.5.2 BACK-TO-BACK RZ-DQPSK

En la Figura 1. 25, se muestra el transmisor y receptor RZ-DQPSK en el simulador Optisim, para poder realizar esta simulación no se consideran ni pérdidas ni distorsiones, las cuales están implícitas en el medio de transmisión (fibra óptica).

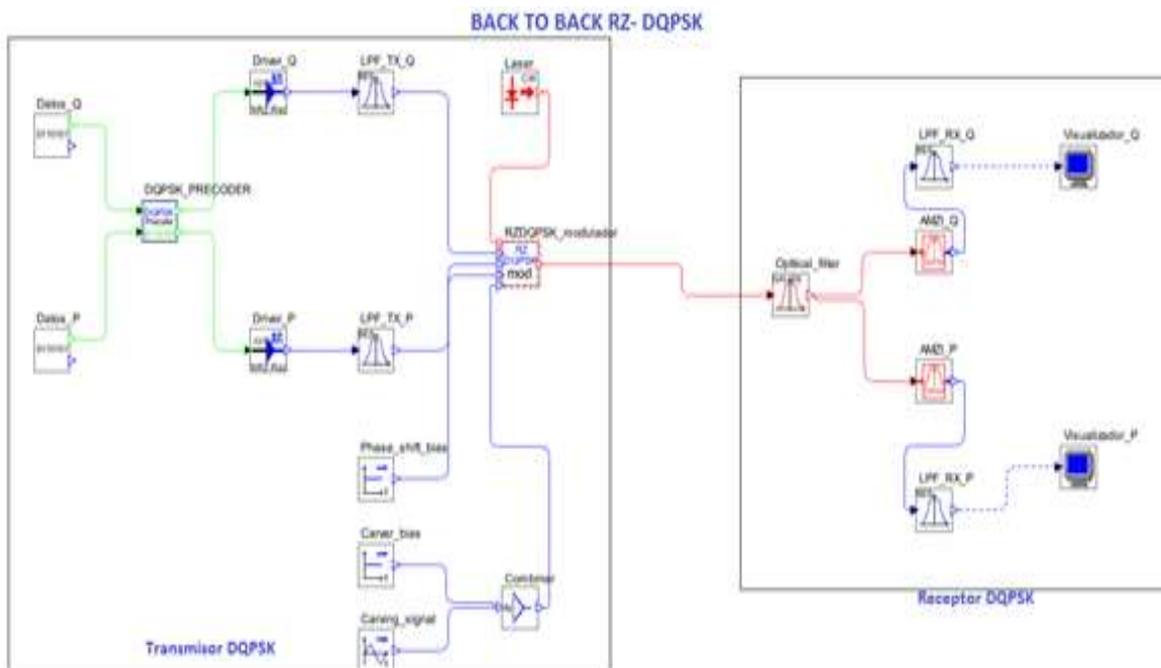


Figura 1. 25 Transmisor y receptor RZ-DQPSK

En la Figura 1. 26, se muestran los diagramas del ojo a la salida del sistema B2B sobre los visualizadores Q y P, respectivamente.

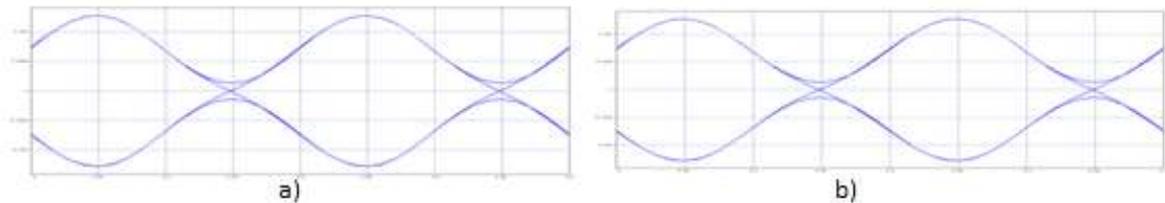


Figura 1. 26 Diagrama de ojo a salida del sistema RZ-DQPSK .a) Visualizador Q b). Visualizador P

En la Figura 1. 27, se presentan los Diagramas de Ojo teóricos [19], utilizados para las comparaciones, con los resultados prácticos obtenidos.

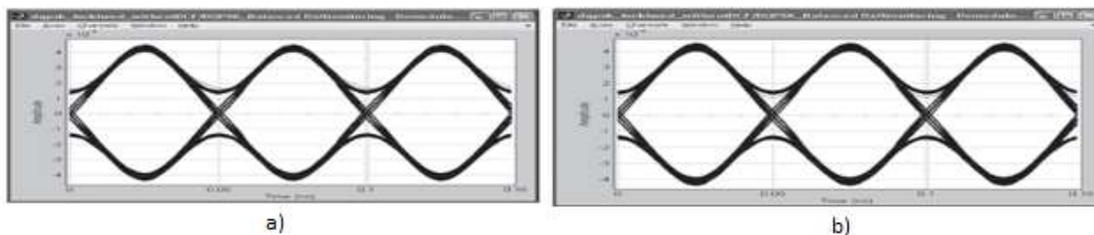


Figura 1. 27 a) Componente P a la salida del sistema. b) Componente Q a la salida del sistema RZ-DQPSK [19]

Después de realizar una comparación de la parte teórica ( Figura 1. 27) vs los resultados obtenidos a partir de la simulación (Figura 1. 26), se puede observar que los diagramas de ojo son similares entre sí, dando cierta garantía que la señal que se está generando en DQPSK, es una señal válida.

En la Figura 1. 28 , se puede observar el espectro en frecuencia, que no existen distorsiones ocasionadas por mala generación de la señal.

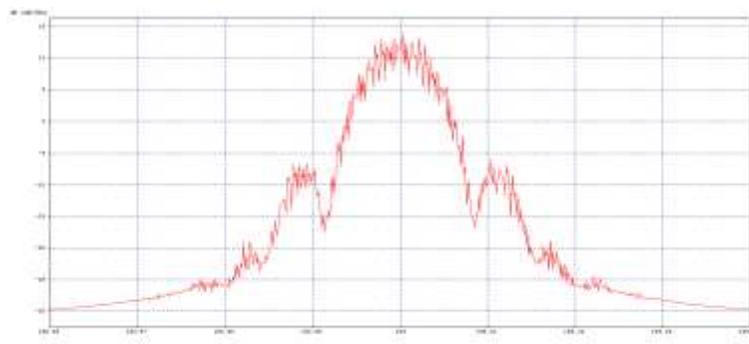


Figura 1. 28 Espectro óptico B2B en frecuencia

Este análisis B2B de las modulaciones RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, permite tener un parámetro de referencia para las comparaciones a realizar en casos posteriores de estudio. A partir de lo anterior, se puede decir que para las realizar las comparaciones entre cada caso de estudio siguiente y el caso

básico B2B, solo se tomara como referencia de comparación tanto el espectro en frecuencia como el diagrama del ojo.

## 1.5 PARAMETROS DE DESEMPEÑO

El monitoreo de desempeño de las redes juega un papel esencial en la futura evolución y en el despliegue de la industria óptica, ya que una de las claves del éxito de las redes de nueva generación será asegurar Calidad de Servicio (QoS) y ofrecer servicios ópticos dinámicos y diferenciados [27].

### 1.5.1 DIAGRAMA DEL OJO

La BER, SNR, OSNR son parámetros de medición que proporcionan información acerca de la calidad del enlace y del desempeño de la transmisión; viéndose involucrado el funcionamiento de los equipos de recepción, transmisión, cable y demás; pero en determinados casos y para diversos inconvenientes, muchos de estos parámetros de medición no son apropiados para encontrar el origen del problema, por esto, se hace necesario e indispensable el uso del diagrama de ojo, ya que permite el análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el canal de transmisión y del cual se pueden deducir parámetros de medición como BER y factor Q [27].

El diagrama de ojo, muestra en un rango de tiempo la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros. Dichas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación (fibra óptica) [27].

El diagrama del ojo es una muy buena herramienta, usada para analizar la calidad de las señales, esta puede ser implementada en el monitoreo de la PMD, ya que es posible hacer análisis cualitativos y cuantitativos para llegar a concluir la existencia o no de la PMD, además de su efecto sobre la señal, como se puede ver en la Figura 1. 29 [28].

De acuerdo a lo anterior, se decide implementar esta herramienta como ayuda en el presente Proyecto.

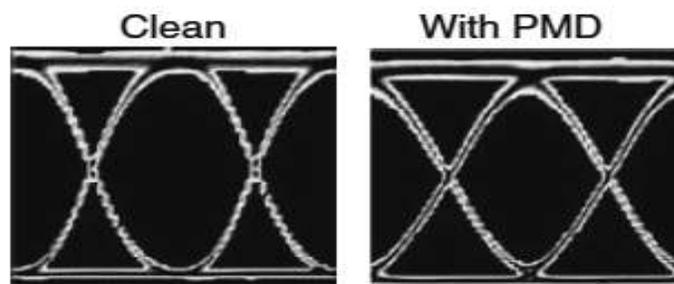


Figura 1. 29 Diagrama del ojo con y sin efectos de la PMD [28]

### 1.5.2 TASA DE ERROR DE BIT -BER

El nivel de la tasa de errores durante la transmisión, se caracterizan con un parámetro denominado BER (Bit Error Rate) [29].

En las redes digitales de transmisión, el concepto de BER tiene tres acepciones que son equivalentes entre sí [29]:

- a. Relación entre el número de bits erróneos recibidos y el número de bits transmitidos

$$BER = \frac{N^{\circ} \text{ de bits erróneos recibidos}}{N^{\circ} \text{ de bits transmitidos}} \quad 1. 14$$

- b. Número de errores ocurridos durante la transmisión de un bit.
- c. Probabilidad de que se reciba un bit erróneo, cuando se ha recibido un cierto número de bits. Una forma de expresarlo sería:

$$BER = [p(0/1)] \quad 1. 15$$

Donde [p (1/0)] representaría la probabilidad de recibir un cero, cuando en realidad se ha transmitido un uno; y [p (0/1)] representaría la probabilidad de recibir un uno cuando en realidad se ha transmitido un cero [29].

### 1.5.3 FACTOR DE CALIDAD Q

El factor Q, es una medida de cuan ruidoso es un pulso con fines de diagnóstico de la calidad del enlace [30].

Un diagrama ABIERTO, es signo de un pulso relativamente libre de ruido, por lo tanto, la data se podrá recuperar fácilmente sin afectar el ruido [30].

El presente capítulo, se propuso una base teórica para el diseño de una red DWDM y la caracterización de los aspectos más importantes del estudio para proyecto a realizar, por lo tanto se tiene que:

- Dentro de las degradaciones más significativas a tener en cuenta, se tiene la PMD, que es sin lugar a duda el impedimento más grande que puede tener las redes de 10 Gbps o mayores velocidades de transmisión.
- Para medir la viabilidad de la implementación de redes ópticas con velocidades iguales o superiores a 10 Gbps, se caracterizaron los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, ya que son formatos de modulación avanzados y presentan un mejor desempeño frente a los efectos lineales y no lineales.

- Se describieron de manera general y se caracterizaron los formatos de modulación; RZ-PDPSK Y RZ-DQPSK, objeto de estudio del presente proyecto de grado, para su posterior análisis comparativo de desempeño en redes DWDM y su tolerancia frente a la PMD.
- Se establecen los parámetros de desempeño del sistema con respecto a los formatos de modulación estudiados e implementados como lo son BER; Factor Q, Diagrama de Ojo.
- Se determinó para la modulación RZ-PDPSK el desfase ( $\tau = 0.65 * T_{bit}$ ), presenta un mejor comportamiento y adicionalmente es el más apropiado para ser implementado en un sistema DWDM.

A continuación, en el capítulo siguiente se definirá una metodología de simulación que se fundamentará en el modelo simplificado de red, para generar escenarios de simulación acorde a los esquemas de modulación escogidos, también la visualización de los efectos provocados por el fenómeno de la PMD, en las redes ópticas DWDM de 10Gbps

## CAPITULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se define la metodología y el proceso de simulación, los cuales permitirán generar, analizar y evaluar, mediante escenarios de simulación, el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK, RZ-PDPSK y su tolerancia frente a la PMD, haciendo uso de la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft.

### 2.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

En la actualidad, existen múltiples softwares de simulación de redes ópticas, debido a que la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, provee a los estudiantes la licencia para la elaboración de sus trabajos de grado, OptSim® de Rsoft.

Este software permite el diseño y evaluación de estas redes, brindando a sus usuarios una interface gráfica de medición flexible, que actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. Debido a la robustez de este software en los últimos años, se ha empleado en distintos trabajos de grado y en diferentes asignaturas del Departamento de Telecomunicaciones, por esta razón se utilizara para el desarrollo del presente proyecto de grado [31].

Este software, define dos modos de simulación, dependiendo del tipo de resultados que se deseen [31]:

- **Modo Bloque:** es una técnica de simulación tradicional, en la cual la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida.
- **Modo Muestra:** se implementa muestra a muestra, de tal forma que la señal de datos pasa entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo. Este modo provee dos tipos de simulación:
  - ❖ **Técnica de Propagación Espectral (SPT, Spectral Propagation Technique):** las señales se propagan en la red como espectro de potencia, teniendo en cuenta las pérdidas de los componentes y el ruido. Además es posible evaluar en cualquier punto de la red, los espectros, niveles de potencia y la relación señal a ruido óptica (OSNR).
  - ❖ **Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, Variable Bandwidth Simulation):** las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable. Si se simula en la opción "VBS Full" se tendrán en cuenta todos los efectos de las fibras tanto lineales como no lineales, por otro lado al simular con la opción "VBS Linear Fiber" se considerará únicamente los efectos lineales y si se requiere simular el efecto de la atenuación se escoge la opción "VBS Loss Only Fiber".

Considerando lo anterior, para el desarrollo de este proyecto se utiliza el modo muestra, con la técnica VBS, ya que permitirá obtener los resultados de los diferentes parámetros a estudiar de manera conjunta.

En la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, también está disponible un elemento llamado **ALL ORDER PMD** (AOPMD), este componente simula el efecto de la PMD, teniendo en cuenta su dependencia con la frecuencia. Este reproduce el comportamiento estadístico de la PMD de una fibra sin pérdidas, dispersión, o, no linealidades de la fibra [31].

El efecto de la PMD, se simula mediante el método waveplates<sup>1</sup>. La fibra es modelada por una serie de elementos de fibra (waveplates), concatenados de igual longitud  $L_p$ . La orientación del Principal Estado de Polarización (PMD, Principal States of Polarization) de cada waveplate, es una variable aleatoria. En cambio, la DGD  $\Delta\tau_p$ , introducida en cada waveplate, es la misma para cada uno de ellos, y es proporcional al coeficiente PMD ( $\delta_{PMD}$  en ps/√Km) de la fibra simulada y la longitud del waveplate  $L_p$ , mediante la ecuación 2.1 [31]:

$$\Delta\tau_p = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \delta_{PMD} \sqrt{L_p} \quad 2.1$$

Además, la longitud de los waveplates  $L_p$  está relacionada con la longitud del "fiber beat"  $L_B$  y la longitud de la fibra correlacionada  $L_C$ , por [31]:

$$L_C = -\frac{L_p}{\ln\left|\cos\left(\pi\frac{L_p}{L_B}\right)\right|} \quad 2.2$$

La DGD  $\Delta\tau$  resultante al final del span de la fibra, es una variable aleatoria con una distribución Maxwelliana y una función de densidad de probabilidad, que es tomada de la ecuación [31]:

$$P(\Delta\tau, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{q^3} e^{\left(-\frac{\Delta\tau^2}{2q^2}\right)} \text{ con } 0 < \Delta\tau < +\infty \quad 2.3$$

Donde:

$$q^2 = \frac{\pi}{8} \delta_{PMD}^2 L_{fibra} \quad 2.4$$

La DGD promedio es:  $\langle \Delta\tau \rangle = \delta_{PMD} \sqrt{L_{fibra}}$

Y la varianza es:  $\sigma_{\Delta\tau} = \sqrt{\left(\frac{3\pi}{8} - 1\right)} \delta_{PMD} \sqrt{L_{fibra}}$

---

<sup>1</sup>PLACAS DE ONDA- Teoría de waveplate (Geometric Interpretation of Waveplate-Induced Polarization Transformation in Stokes Space )- <http://www.av.it.pt/anp/doc/papers/conferences/2006/seon-nelson.pdf>

A continuación se describen los elementos que se pueden encontrar y modificar en el módulo AOPMD:

Instancia [-]: la instancia es un número entero que identifica el bloque. Este número es usado por Optsim para generar un archivo de datos que contiene el bloque de salida. Este valor debe ser usado con cuidado, en particular, si el mismo modelo incluye muchas instancias del componente AOPMD, el valor del parámetro tiene que ser diferente para cada bloque AOPMD [31].

Longitud [Km]: especifica la longitud de la fibra PMD.

PMD\_ coeficiente [ $ps/Km^{1/2}$ ]: el coeficiente PMD  $\delta_{PMD}$ , este usualmente es especificado en data sheets, para cuantificar la cantidad de la PMD introducida por la fibra [31].

Longitud de Correlación [KM]: la longitud de correlación  $L_C$  expresada en kilómetros. Este indica la distancia, en donde el Estado de Polarización de una señal, pierde la información de entrada del estado de polarización, debido a la PMD y la birrefringencia [31].

Beat\_length [m] la longitud de la fibra beat  $L_B$  expresada en metros. Esta es definida como la distancia después de la polarización de la señal propagada, recobra su estado inicial [31]

Seed: un número entero, que define la semilla para el proceso estadístico usado en el modelo PMD [31].

## 2.2 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para realizar el análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK, RZ-PDPSK en una red DWDM a 10 Gbps y su tolerancia frente a la PMD, es necesario seguir una metodología de simulación, que está constituida por una serie de pasos, los cuales conllevan al cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto de grado. Los pasos o procesos de simulación son:

- Definición de los escenarios de simulación y casos de estudio.
- Identificación de los parámetros técnicos de los escenarios y casos de simulación.
- Ejecución de la simulación.
- Análisis de los resultados de la simulación.

### 2.2.1 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

Para cumplir con el objetivo de este proyecto de grado: realizar el análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, en redes DWDM a 10 Gbps y su tolerancia frente a la PMD, se plantean dos escenarios de simulación, cada uno de estos con cuatro

casos y cada uno de ellos con configuraciones específicas, como se puede observar en la Figura 2. 1, para cada caso se estudian los siguientes parámetros:

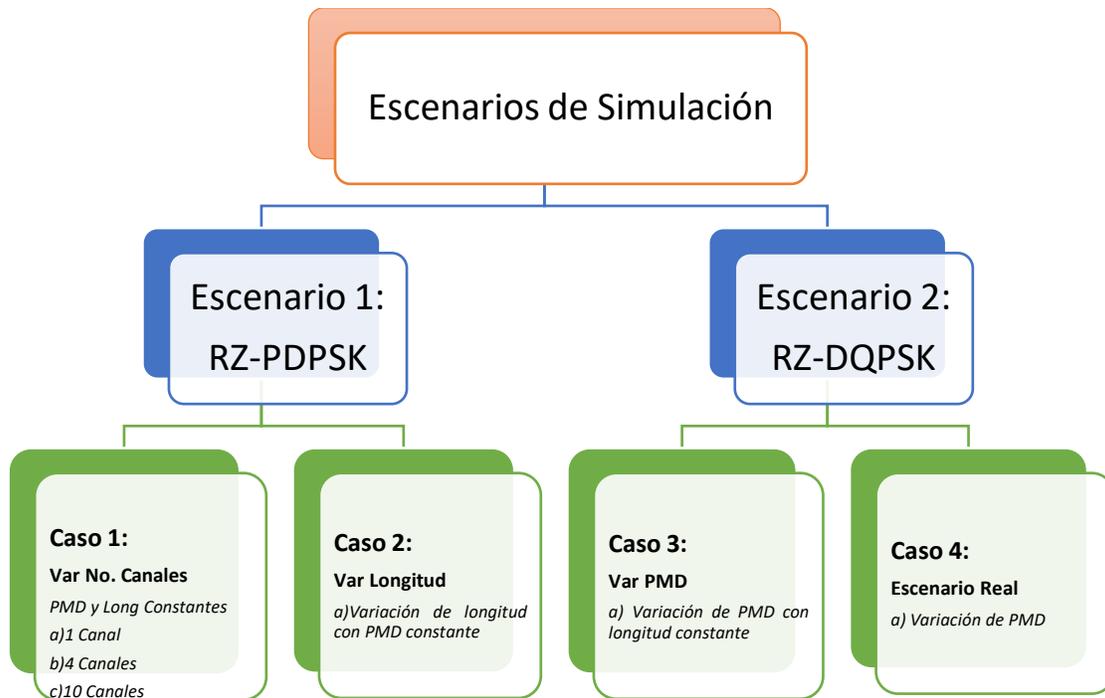


Figura 2. 1 Escenarios y Casos de simulación.

Cada uno de estos casos, serán explicados en el desarrollo de esta metodología de simulación.

#### 2.2.1.1 ESCENARIO DE SIMULACIÓN:

Teniendo en cuenta que se deben generar condiciones en la red para analizar el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, se definen dos escenarios de simulación, basados en un sistema DWDM, que está compuesto por tres elementos básicos: transmisor, medio de transmisión, y receptor, la topología establecida es punto a punto, como se aprecia en la Figura 2. 2

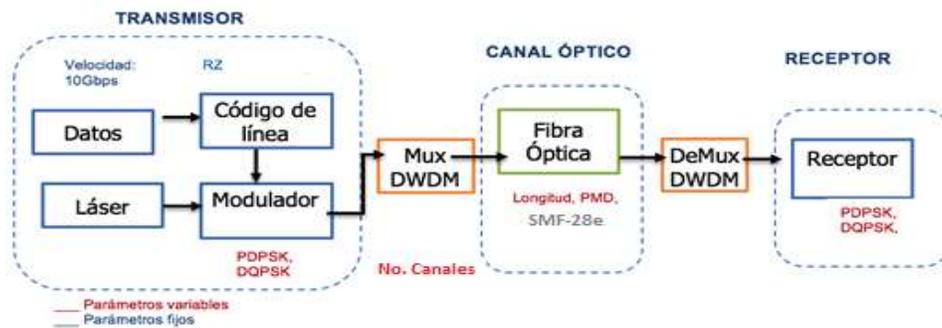


Figura 2. 2 Esquema Escenario General de Simulación Escenario

En la Figura 2.2, se representa el esquema general de los escenarios de simulación. De acuerdo al modulador (PDPSK o DQPSK) se pueden tener dos escenarios de simulación y dentro de cada uno, se obtienen cuatro casos para cada escenario, a su vez, se tendrán configuraciones específicas para cada caso. En cada uno de estos se determinan como parámetros fijos y variables los siguientes:

Parámetros variables:

- **En el transmisor:** tipo de modulación y número de canales (caso DWDM).
- **En el canal:** longitud de la fibra y parámetros PMD.
- **En el receptor:** configuración de receptor acorde a configuración del transmisor

Parámetros fijos:

- **En el transmisor y receptor:** potencia laser, velocidad de los datos.
- **En el canal:** tipo de fibra: SMF-28 e.

**Escenarios de simulación:** Se definen dos escenarios de simulación, el escenario 1 conformado por el formato RZ-PDPSK y el escenario 2 por RZ-DQPSK.

### 2.2.1.2 CASOS DE ESTUDIO:

Se han definido cuatro casos de estudio para cada escenario de simulación:

- **CASO DE ESTUDIO 1 (VARIACIÓN NÚMERO DE CANALES):**

Para una transmisión a 10 Gbps (por canal) de una red DWDM, en los formatos de modulación DQPSK y PDPSK, se realiza una serie simulaciones, en donde permanecen constantes los parámetros de longitud y coeficiente de PMD, modificando el número de canales de transmisión (1, 4, 10), para verificar la tolerancia a la PMD sobre el número de canales, con el objetivo de obtener valores óptimos de desempeño, como son la BER y factor Q, y medir el comportamiento de la DGD para cada variación.

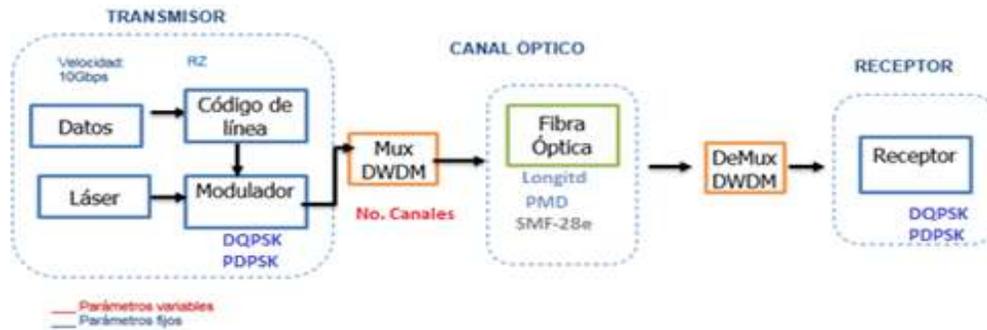


Figura 2. 3 Caso de estudio 1

- **CASO DE ESTUDIO 2 (VARIACIÓN LONGITUD):**

Para una transmisión a 10 Gbps de una red DWDM, en los formatos de modulación DQPSK y PDPSK, se realiza una serie de simulaciones partiendo de los resultados obtenidos en el caso 1, en donde se modifica el parámetro de la longitud del enlace, con un coeficiente de PMD constante, para observar el comportamiento de una red a la PMD, encontrando la tolerancia de la red con respecto al comportamiento de la DGD, para cada variación.

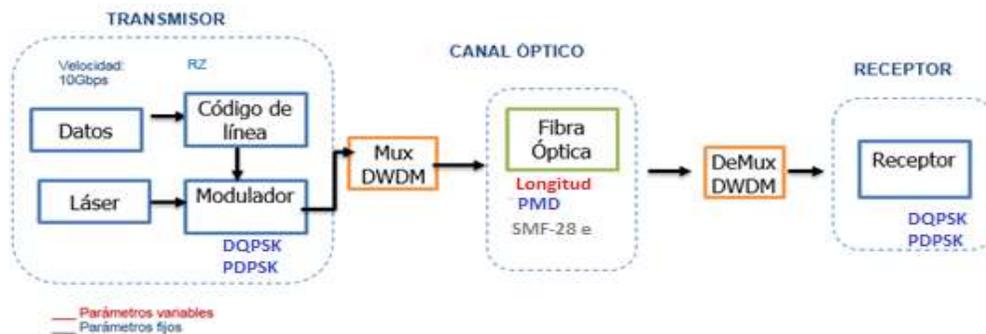


Figura 2. 4 Caso de estudio 2

- **CASO DE ESTUDIO 3 (VARIACIÓN COEFICIENTE PMD):**

Para una transmisión a 10 Gbps de una red DWDM, en los formatos de modulación DQPSK y PDPSK, se realiza una serie de simulaciones partiendo de los resultados obtenidos en el caso 1, en donde se modifica el parámetro del coeficiente de la PMD del enlace, con una longitud constante, para observar el comportamiento de una red a la PMD, encontrando la tolerancia de la red con respecto al comportamiento de la DGD, para cada variación.

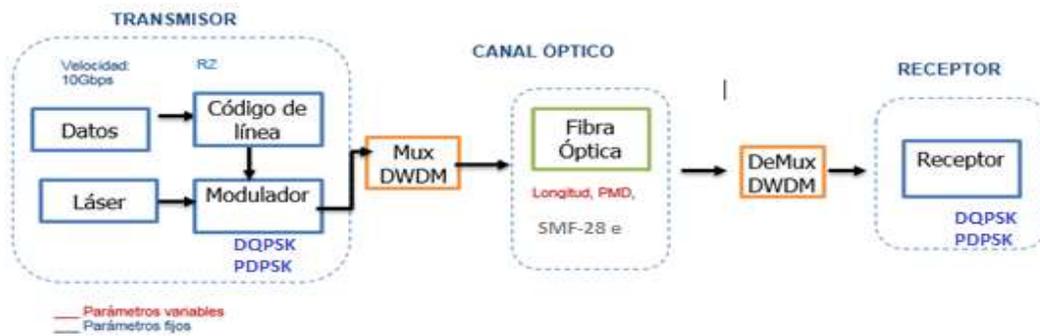


Figura 2. 5 Caso de estudio 3

• **CASO DE ESTUDIO 4 (“ESCENARIO REAL DE SIMULACIÓN”)**

Para una transmisión a 10 Gbps de una red DWDM, en los formatos de modulación DQPSK y PDPSK, juntos, se van a realizar variaciones de longitud y coeficiente de PMD, manteniendo una dispersión cromática lo suficientemente reducida, para que el efecto de la PMD sobre la distorsión del pulso y el desvanecimiento de la señal, pueda ser observado [32], para verificar el comportamiento del enlace, con el objetivo de obtener valores óptimos de desempeño, como son la BER y factor Q.

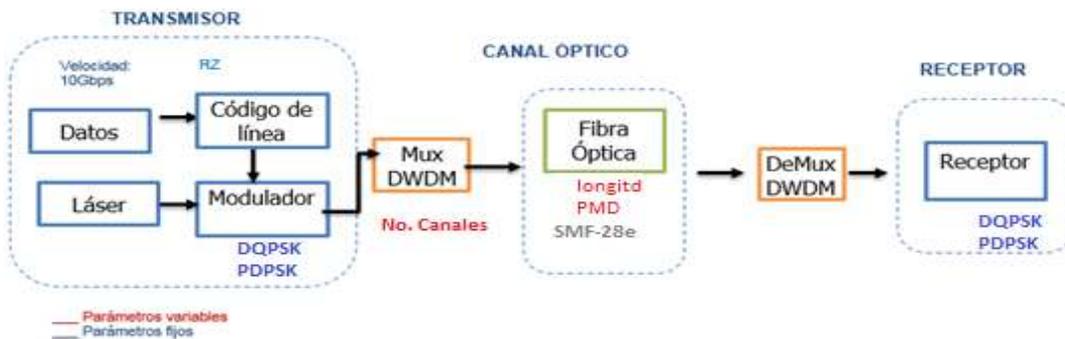


Figura 2. 6 Caso de estudio 4

**2.2.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

Teniendo en cuenta la caracterización de los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK realizada en el capítulo 1, se procede a configurar dos escenarios de simulación, donde se reflejen las propiedades principales de estos formatos, para posteriormente efectuar su implementación a nivel de simulación de tal manera que permita realizar el análisis comparativo el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, en redes DWDM a 10 Gbps y su tolerancia frente a la PMD, para cumplir con estándares mínimos de desempeño.

La caracterización de los escenarios de simulación se fundamenta en:

Emplear la fibra óptica SMF-28e, ya que es el tipo de fibra óptica con mayor implementación en redes DWDM comerciales [33] , ligadas a las características mostradas en la Tabla 2. 1

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Diámetro de campo modal	Rango de valores nominales	8.6 - 9.5 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	Nominal	125 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 1\mu\text{m}$
Atenuación	1310 nm	$\leq 0.4 \text{ dB/km}$
	1550 nm	$\leq 0.35 \text{ dB/km}$
PMD	Valor de diseño para enlace	0.2 ps/km <sup>1/2</sup>
	Máximo de Fibra Individual	0.2 ps/km <sup>1/2</sup>
Coefficiente de Dispersión Cromática	1310 nm y 1550 nm	16 ps/nm.km

Tabla 2. 1 Parámetros de la Fibra Corning SMF-28 [33].

Trabajar canales en la banda C (1530-1560 nm), alrededor de los 1550 nm, banda de operación en la que la fibra G.652, presenta atenuación mínima .Considerar un rango amplio de potencias de transmisión, entre -5 dBm y 25 dBm, y una sensibilidad del receptor de -30 dBm .Tener en cuenta que en el contexto nacional, las distancias típicas de los enlaces oscilan entre los 80 Km y los 120 Km, en casos donde se pueden encontrar casos de longitud fija (100 km) [34].

Según [34] [35], en el contexto nacional los equipos más utilizados son OSN de HUAWEI en sus series OptiX OSN, responsables de manejar las señales ópticas STM-64.

Después de realizar la especificación de las características de la transmisión, los escenarios de simulación se pueden resumir en Tabla 2. 2

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Velocidad del Sistema	10Gbps
Tecnología de Red	DWDM
Banda	Banda C ( 1530-1560 nm)
Ventana	alrededor de 1550 nm
Estándar Utilizado	G.652.b
Tipo de fibra	SMF-28
Espaciamiento de los canales WDM	50 GHz (0.4nm)
Número de canales implementados	1 -4 y 10 canales
Atenuación para 1550nm	0.2 dB/Km
Coefficiente PMD	$0.2^{ps} / \sqrt{km}$

<b>DGD Máxima</b>	10% Tb (tiempo de Bit)
<b>Coefficiente de Dispersión 1550nm</b>	16 ps/ nm.km
<b>CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR</b>	
<b>Formato de modulación</b>	RZ-PDPSK, RZ-DQPSK
<b>Tipo de Modulación</b>	Externa con Mach-Zehnder
<b>Potencia de Tx del Láser</b>	De -5 dBm a 25 dBm
<b>CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR</b>	
<b>Sensibilidad del Rx</b>	-30 dBm
<b>Q</b>	17dB
<b>BER</b>	1e-12

Tabla 2. 2 Características del escenario de Modulación

### 2.2.3 EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN

En los siguientes capítulos, se realizará la ejecución de la simulación y análisis de resultados. En el capítulo 3 se abordarán el análisis de los efectos que impone la PMD a cada uno de los formatos de modulación que son el caso de estudio del presente proyecto (RZ-PDPSK, RZ-DQPSK) además del desempeño del sistema mediante los parámetros de monitoreo óptico (OPM). Para tal fin se propone un plan de pruebas, un proceso de simulación mediante la herramienta Optsim, en donde se podrá realizar una visualización detallada y un análisis de resultados, en el capítulo 4 se presentaran el análisis comparativo de los resultados de la simulación y el capítulo 5, las conclusiones generales, recomendaciones y los trabajos futuros.

#### 2.2.3.1 PLAN DE PRUEBAS

Para realizar el proceso de simulación se tiene en cuenta los parámetros OPM, tales como: BER y factor Q, establecidos en la recomendación de la ITU-T G.sup39 [36], la cual sugiere un valor de BER =  $10^{-12}$  y Q = 17,03 dB, ya que al mantener el sistema con parámetros estándar la migración del mismo optimizará recursos. Para verificar los casos de estudio definidos en la primera fase de la metodología se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Verificación de la máxima distancia alcanzable (Considerando la DGD máxima permitida).
- Verificación de los efectos de la PMD.
- Verificación del coeficiente PMD máximo alcanzable (Considerando la DGD máxima permitida).
- Verificación de los parámetros de monitoreo óptico OPM.

#### 2.2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Como se citó anteriormente, en los diferentes casos de estudio se analizará: la máxima distancia alcanzable por el enlace (por tolerancia y desempeño), efecto de la PMD, máximo coeficiente de

PMD permitido por tolerancia y los parámetros de desempeño. Se debe tener en cuenta el cumplimiento de los parámetros recomendados para un rendimiento que permite la optimización de recursos de red, los cuales son una BER =  $10^{-12}$  y Q = 17,03 dB. En conclusión para el proceso de simulación se llevaran a cabo los siguientes pasos:

- ✓ Implementación del escenario de simulación.
- ✓ Validación de los casos de estudio derivados del escenario de simulación.
- ✓ Ejecución de la simulación.
- ✓ Reunir, examinar y analizar los resultados obtenidos.

En la Figura 2. 7 se observa de forma gráfica el algoritmo que contiene los pasos para una correcta simulación, los resultados y el respectivo análisis de estos se desarrollan en capítulos posteriores.

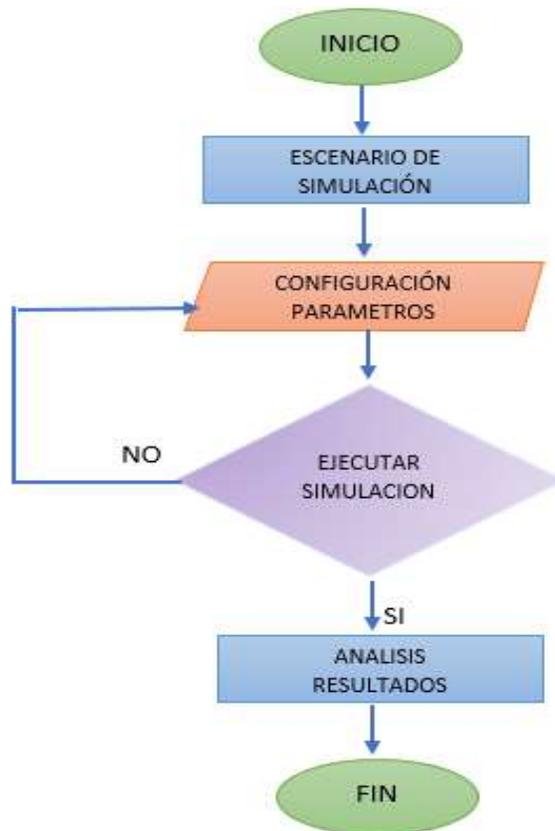


Figura 2. 7 Diagrama de flujo, casos de uso análisis de resultados de simulación.

### **CAPITULO 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACION Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD**

En el capítulo 1, se estudió el fundamento teórico de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, al igual que las redes DWDM, la caracterización y los efectos de la PMD, en el capítulo 2, se definieron dos escenarios de simulación, de los formatos estudiados, cada escenario consta de cuatro casos de estudio, cada uno de estos con sus configuraciones pertinentes.

En el presente capítulo, se desarrolla el proceso de simulación, mediante la herramienta Optsim® de Rsoft descrita en el capítulo 2, enfocando el análisis al efecto lineal: PMD, que afecta el desempeño de las redes DWDM, para cada uno de los casos de estudio, mediante el análisis de los parámetros de desempeño, de acuerdo con la metodología planteada en el capítulo 2.

Para los dos escenarios de simulación en sus cuatro casos de estudio se realizaron configuraciones tales como: el generador binario: Bit Rate a 10 Gbps; Modo de Secuencia: pseudo aleatoria; Muestras por Bit: 270; Fuente Óptica (Laser):1 lorentzian; Potencia de Salida: 0 dbm; Fase Inicial: 0 rad; MZI; Filtros Ópticos de Bessel: ancho espectral: 50 GHz, con 3 polos(para lograr una mejor respuesta); MZI: en el cual se puede hacer una variación del retardo en una de sus ramas; y en sus casos de estudio: primer, segundo y tercero, es necesario hacer uso del componente ALL ORDER-PMD, descrito su funcionamiento y características en el capítulo 2.

De igual manera en los casos de estudio 1, 2 y 3, de simulación, para encontrar los valores máximos de tolerancia de la PMD, para las modulaciones RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, es necesario utilizar variaciones de longitud y de coeficiente de PMD, por fuera de los parámetros típicos de configuración, ya que el módulo AOPMD, aísla todos los efectos lineales y no lineales, dejando solo la PMD, obteniendo con esto, la DGD máxima para la velocidad de transmisión implementada en el presente proyecto de grado (10 Gbps).

#### **3.1 ESCENARIO 1: RZ-PDPSK**

##### **3.1.1 CASO DE ESTUDIO 1: VARIACIÓN NÚMERO DE CANALES**

En las Figura 3. 1, Figura 3. 2 y Figura 3. 3, se muestran los esquemáticos, usados para las simulaciones de variación de número de canales para 1, 4 y 10 canales ópticos, respectivamente, para una modulación RZ-PDPSK.

Para la realizar las simulaciones de variación de número de canales, se configuró el bloque ALL-ORDER-PMD (AOPMD), con un coeficiente de PMD de  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  y una longitud de 100 km (valores típicos, utilizados en los enlaces).

Para realizar la simulación de variación de número de canales para 1 canal, se estableció una frecuencia de emisión centrada en 193.1 THz.

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

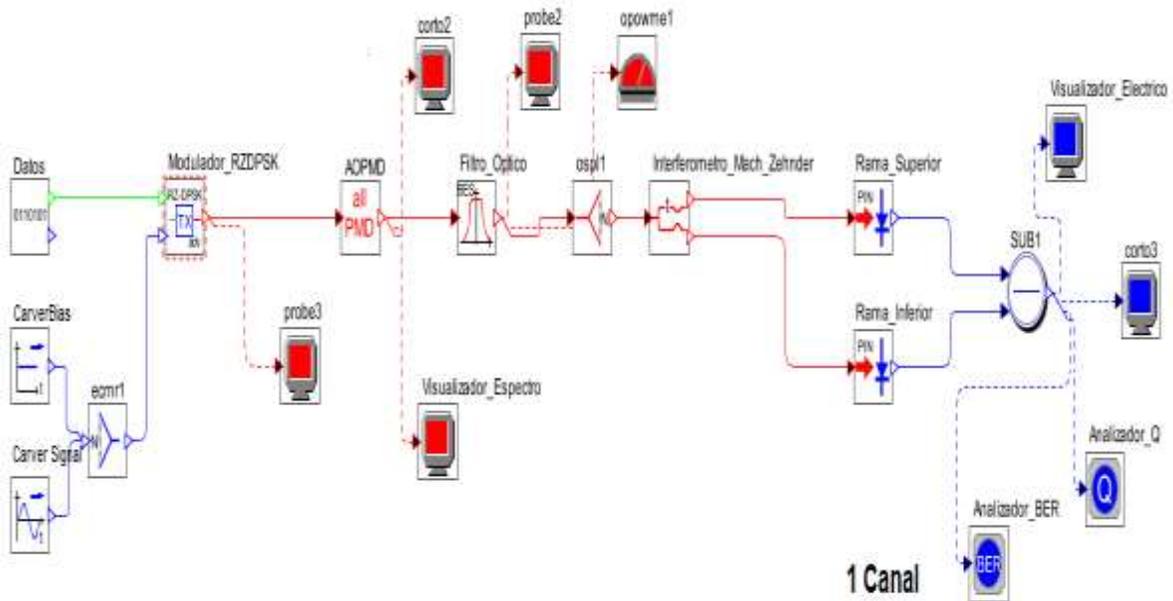


Figura 3. 1 RZ-PDPSK para 1 canal

Para realizar la simulación de variación de número de canales para 4 canales, es establecieron frecuencias de emisión centradas en 193.1 THz, 193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz, para cada canal, respectivamente.

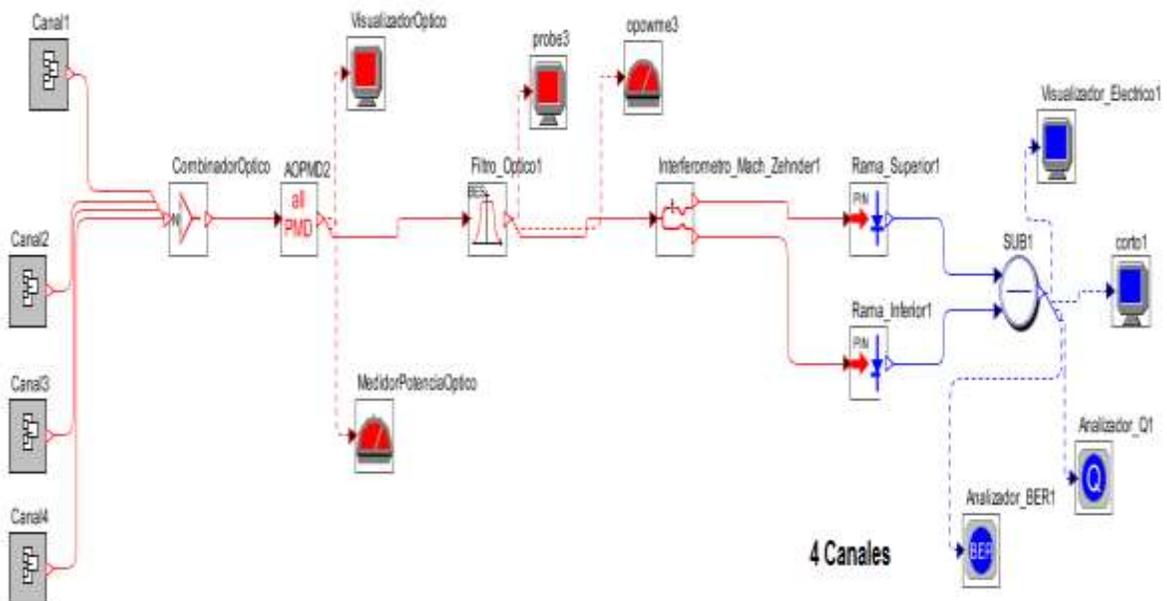


Figura 3. 2 RZ-PDPSK para 4 canales

Para realizar la simulación de variación de número de canales para 10 canales, es establecieron frecuencias de emisión centradas en 193.1 THz, 193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz, 193.5 THz, 193.6 THz, 193.7 THz, 193.8 THz, 193.9 THz, 194.0 THz para cada canal, respectivamente.

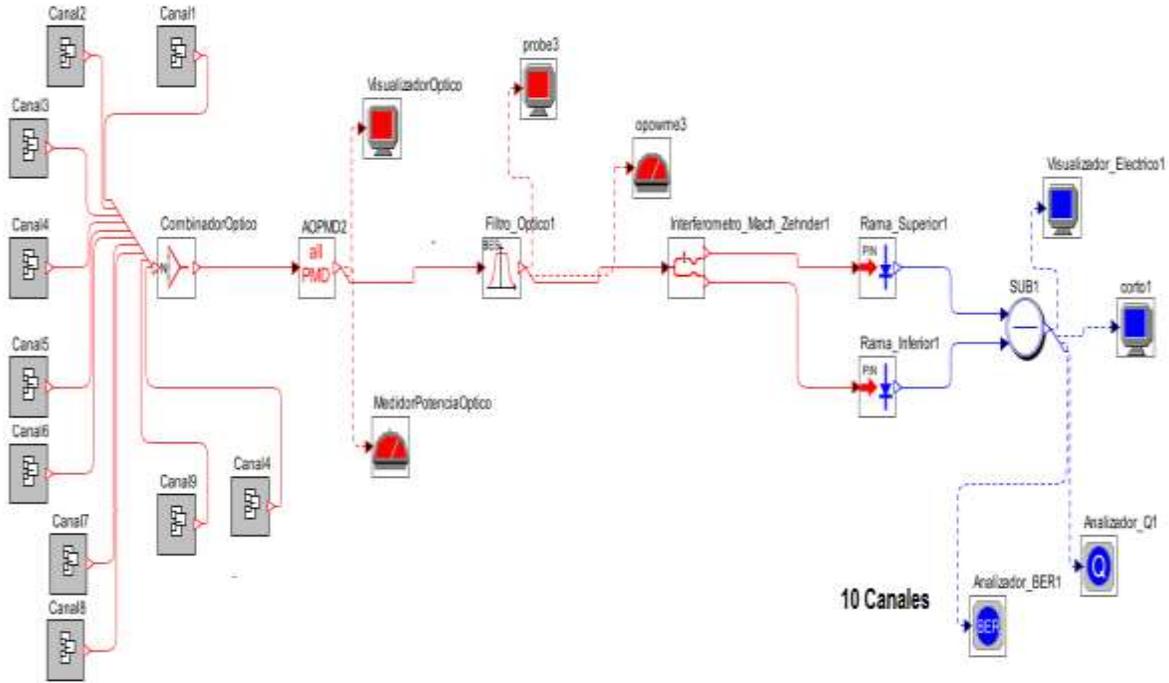


Figura 3. 3 RZ-PDPSK para 10 canales

El análisis de la variación de canales, tiene sentido en el análisis del espectro, antes del filtrado específico de canal, ya que después de este filtro solo se hace el análisis de un canal, perdiendo la información acumulada del efecto de la PMD, sobre el espectro.

El espectro óptico RZ-PDPSK (Figura 3. 4, Figura 3. 5, Figura 3. 6), para una señal Back-to-Back (línea verde), para 1, 4 y 10 canales, respectivamente, enfrentada con una señal, en donde se hace una variación del parámetro coeficiente de PMD= 0,2 (línea roja), encontrando diferencia de los valores pico consignados en la Tabla 3. 1, evidenciando así el efecto de la PMD sobre el espectro (para 10 canales, se hace el análisis a partir del valor promedio de los valores pico).

No. Canales	Diferencia Valores Pico (dB)
1	7
4	2,35
10	6,63

Tabla 3. 1 Diferencia Valores pico

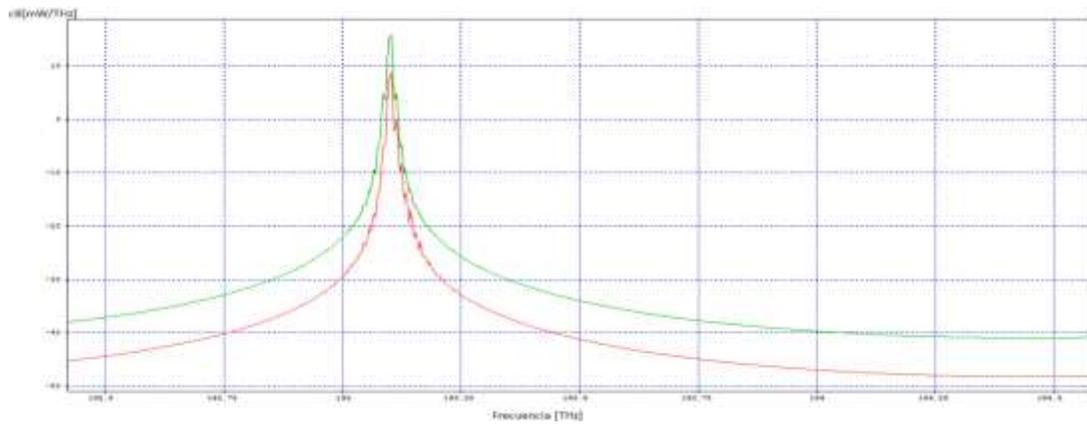


Figura 3. 4 Espectro Óptico RZ-PDPSK para 1 canal

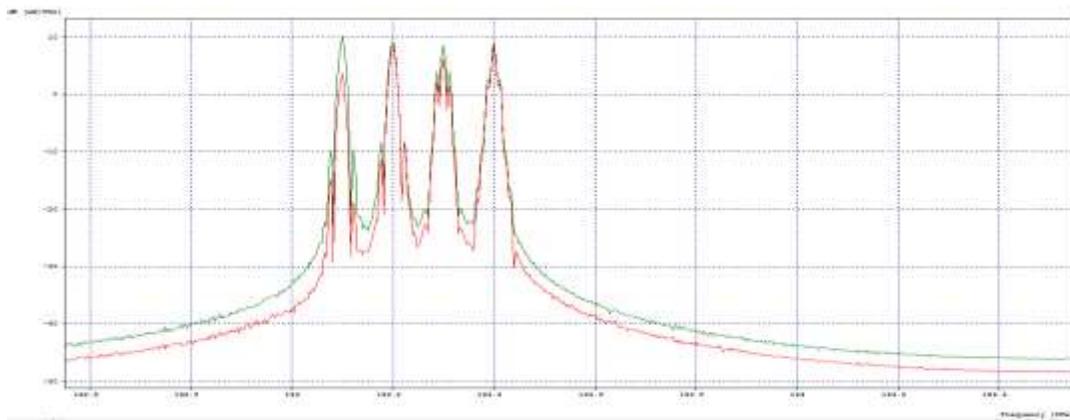


Figura 3. 5 Espectro Óptico RZ-PDPSK para 4 canales

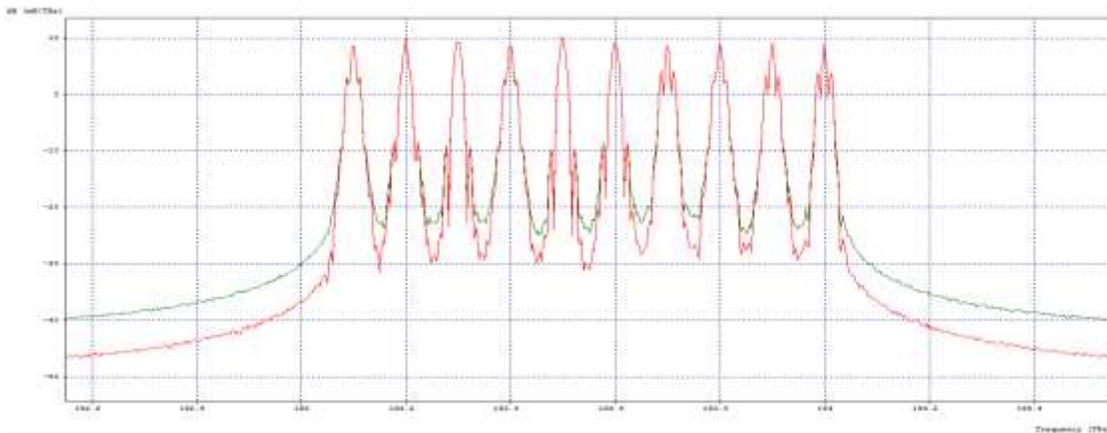


Figura 3. 6 Espectro Óptico RZ-PDPSK para 10 canales

Se realiza un análisis, a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, anteriormente mostradas, utilizando los archivos (casos-PDPSK-AOPMD-(long, pmd) para 1, 4, 10 canales)<sup>2</sup> generados por el simulador. Ya que la PMD, afecta de manera distinta a las componente X e Y del espectro, evidenciado en las Figura 3. 4, Figura 3. 5, Figura 3. 6, se tienen en cuenta estos casos para el análisis del efecto de la PMD sobre la variación del número de canales.

Para encontrar la medida del cambio del espectro óptico, para cada uno de los casos anteriores, se hace un análisis por medio del error cuadrático medio, utilizando la ecuación:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x[1]-x[i])^2}{N}} \quad 3.1$$

Con la implementación de la ecuación 3.1, se obtuvo la siguiente:

No. Canales	Espectro	Error
1	X	3.2712
1	Y	2.3503
4	X	1.2988
4	Y	1.0143
10	X	1.8405
10	Y	1.5755

Tabla 3. 2 Errores vs No. de canales espectro RZ-PDPSK

Encontrando, a partir de los resultados obtenidos en la Tabla 3. 2, que hay una menor perturbación en el espectro Y, a comparación de los valores obtenidos del espectro X.

Con este caso de estudio; variación de número de canales, se puede concluir que cuando se está trabajando a 4 canales, se tiene una mayor tolerancia al efecto de la PMD Por esta razón para casos de estudio posteriores solo se mostraran y describirán las simulaciones realizadas para 4 canales, por otra parte las simulaciones realizadas para 1 y 10 canales se encuentran en el en el documento de anexos, en el cd del presente proyecto de grado.

Por otro lado la cantidad de información que se puede transportar con 4 canales (40Gbps) se equipara con el pico de consumo diario que se está presentando en nuestro país. Según NAP Colombia Figura 3. 7, el máximo de consumo por hora se ubica alrededor de las 16:00 en 35000000Kbps que sería aproximadamente 33.3Gbps, de ahí la importancia de este caso (4 canales) para nuestra investigación.

---

<sup>2</sup> Anexos encontrados en la carpeta Anexos – Casos, cd del proyecto de grado

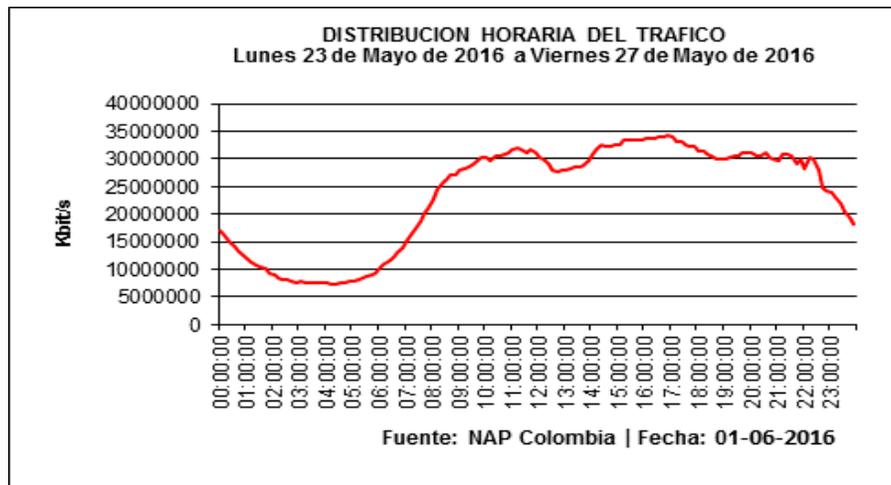


Figura 3. 7 Gráfico consumo diario de Internet en Colombia <sup>3</sup>

### 3.1.2 CASO DE ESTUDIO 2: VARIACIÓN LONGITUD

Al realizar las simulaciones de variación de longitud, se tomaron de igual forma, como en el caso de estudio anterior, una variación de 4 canales<sup>4</sup> por esta razón se utilizaron los mismos modelos esquemáticos.

Configurando el parámetro ALL-ORDER-PMD (AOPMD), con un coeficiente de PMD de  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  y una variación de longitud de 0km hasta 6000 km, con variaciones de longitud de 100 km por tramo, para cada número de canales.

#### 3.1.2.1 Variaciones de DGD vs longitud, para 4 canales.

Por medio del componente AOPMD, se obtiene un análisis estadístico de la PMD, basado en el modelo waveplate de segmentos concatenados. Dando como resultado una DGD con respecto a las variaciones de cada longitud.

La variación de la DGD con respecto a la longitud Figura 3. 8, tomada en el componente AOPMD, el cual hace una emulación de la fibra óptica, asilando todos los efectos (de primer y segundo orden), garantizando que el análisis solo será enfocado, sobre el efecto de la PMD, sobre 4 canales.

---

<sup>3</sup> Figura encontrada en [http://nap.co/images/graficas/historico/dist\\_picos-7.gif](http://nap.co/images/graficas/historico/dist_picos-7.gif)

<sup>4</sup> Las variaciones de longitudes para 1 y 10 canales se puede visualizar en el documento de anexos- A en el cd del presente proyecto de grado

## Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

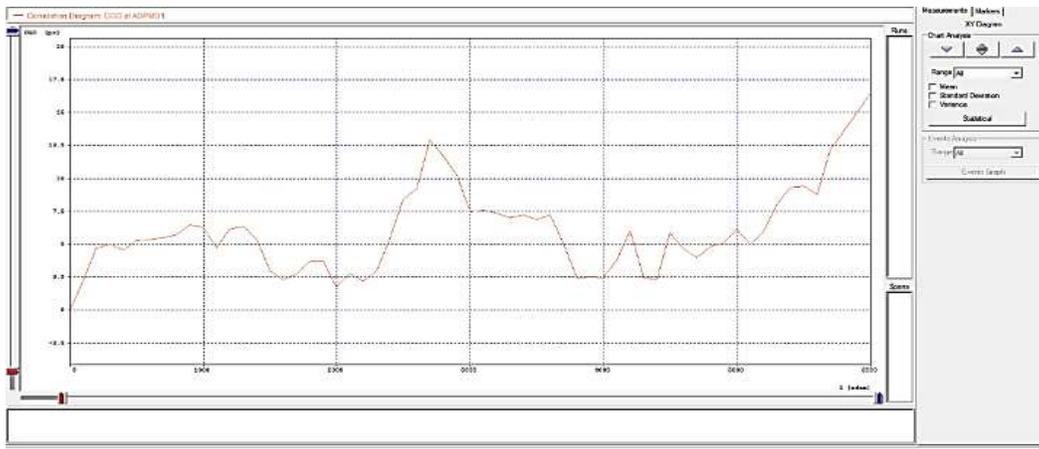


Figura 3. 8 DGD vs Longitud RZ-PDPSK, para 4 canales

En la Figura 3. 9, se muestra la ampliación de la Figura 3. 8, percibiendo en la intersección encerrada en el círculo, un máximo valor de DGD, que para el caso de estudio correspondiente, al valor de tolerancia máximo (por diseño), del 10% del tiempo de bit ( $t_b=100$  ps), que sería equivalente a un DGD máximo de 10 ps. Dando como resultado en la Figura 3. 9, que este valor máximo se alcanzó a una longitud de 2620.19 Km, pero teniendo en cuenta que en una aplicación real no es posible alcanzar esa distancia con un enlace de fibra óptica, sin tener de por medio amplificadores y/o regeneradores de señal

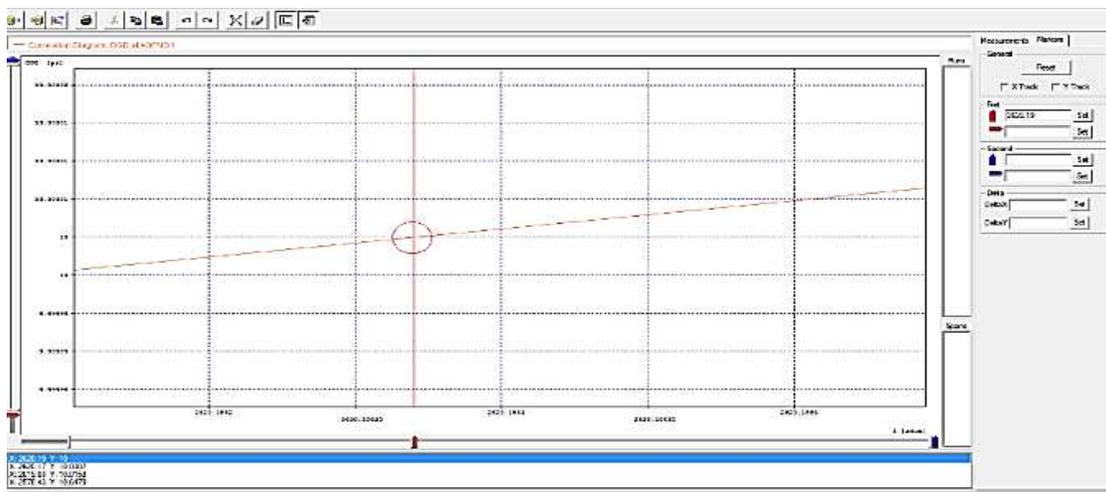


Figura 3. 9 Ampliación Figura 3. 8

La variación del factor Q, con respecto a las variaciones de longitud, se obtuvieron valores óptimos, para todas las variaciones de longitud, consiguiendo una pequeña diferencia cerca del 1%, en algunas longitudes, con esto se puede concluir que PMD por sí sola no afecta el valor de Q, con respecto a la variación de longitud, para la modulación RZ-PDPSK a 4 canales.

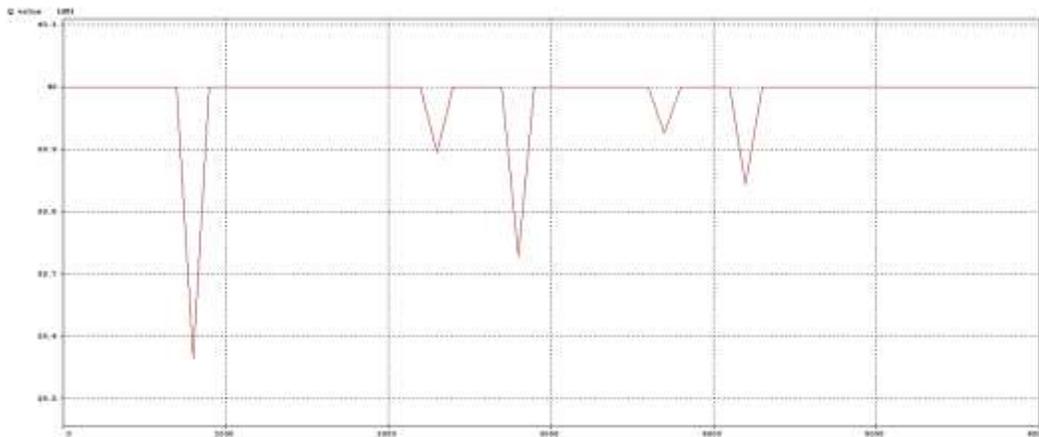


Figura 3. 10 Factor Q vs variación de longitud

En la variación del factor BER, con respecto a las variaciones de longitud, se obtuvieron valores óptimos de BER=1 e-40 dB, constante para estas variaciones, con esto se puede concluir que PMD por sí sola no afecta el valor de BER, con respecto a las variaciones de longitud, para la modulación RZ-PDPSK, a 4 canales.



Figura 3. 11 Factor BER vs variación de longitud

### 3.1.2.2 Variaciones de longitudes, para 4 canales para espectro X:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en el caso de variación de número de canal. Se tomaron los espectros encontrados, para cada una de las longitudes que se variaron y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático Figura 3. 12, con el fin de encontrar una tendencia de la variación del efecto de la distorsión del espectro óptico de la señal, causado por el efecto de la PMD.

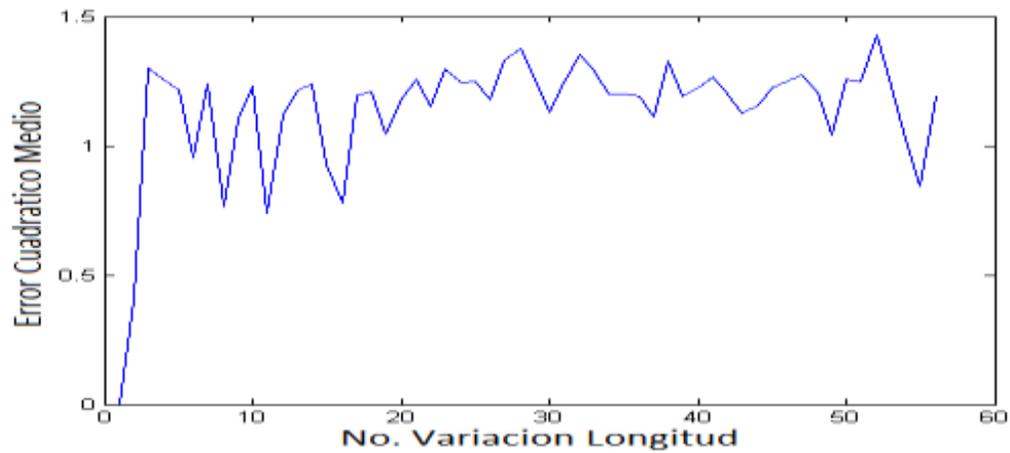


Figura 3. 12 Error medio cuadrático vs variación de longitud para 4 canal RZ-PDPSK. Espectro en X

Mediante el uso de la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab<sup>5</sup>, se realizó una regresión lineal de la Figura 3. 12, obteniendo los resultados de la regresión lineal de la Figura 3. 13 y Figura 3. 14.

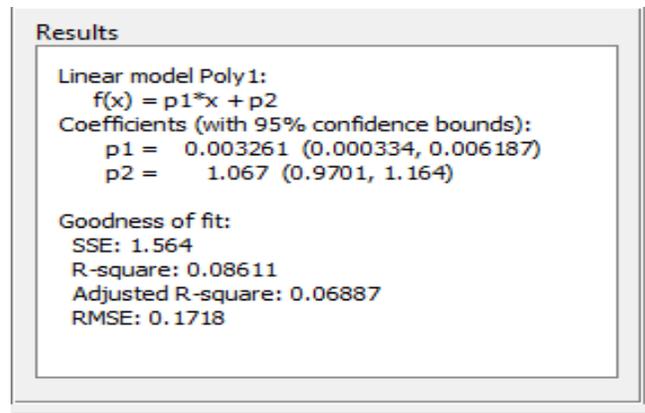


Figura 3. 13 Resultados regresión lineal de la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab

---

<sup>5</sup> Referencia Fitting Toolbox de Matlab-<http://www.mathworks.com/products/curvefitting/>

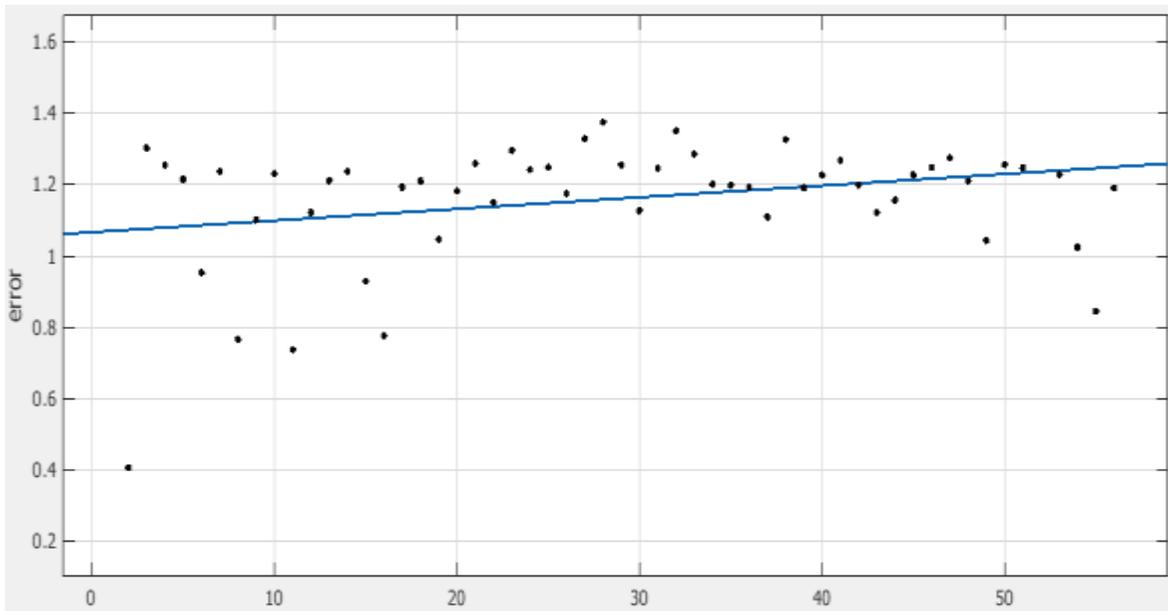


Figura 3. 14 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación de longitud, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia para nuestra investigación, porque da el peso específico de la variación del error cuadrático con respecto a la longitud, para este caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1 = 0.03261$ , que se obtiene a partir de lo generado por la herramienta, mostrado en la Figura 3. 13, lo cual se tomara como base para obtener el valor de  $p_1$  para todas las regresiones lineales del error medio cuadrático posteriores.

$$f(x) = p_1 * x + p_2 \quad 3.2$$

### 3.1.2.3 Variaciones de longitudes, para 4 canales para espectro Y:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en X de la variación de longitudes, se tomaron los espectros encontrados, para cada una de las longitudes que se variaron y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático, Figura 3. 15.

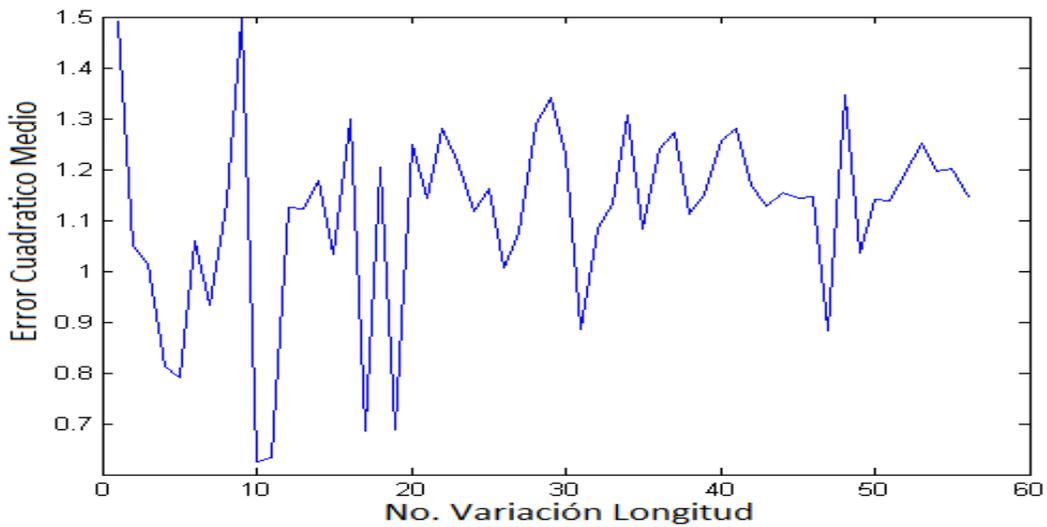


Figura 3. 15 Error medio cuadrático vs variación de longitud para 4 canal RZ-PDPSK. Espectro en Y

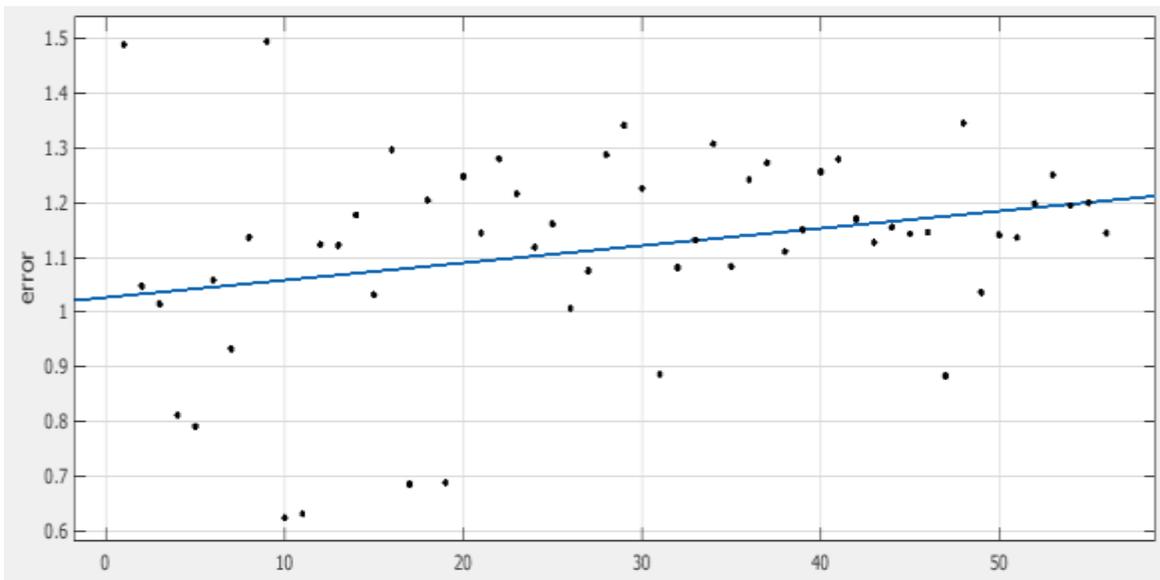


Figura 3. 16 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación de longitud, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del error cuadrático con respecto a la longitud, para esto caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1=0.003159$ .

Se obtuvieron las variaciones de la apertura del ojo Figura 3. 17, para los diferentes valores de longitud, para 1, 4 y 10 canales, aunque en la gráfica se muestra que para 4 canales hay un cambio considerable, en el resultado del error con respecto al valor de la apertura de ojo del B2B, se puede ver que hay una similitud entre los valores para 1 y 10 canales, siendo este último importante por

la cantidad de información que lleva, además siendo 10 canales, el número de canales más apropiado para una red DWDM debido a que se disminuye el costo de transmisión por bit.

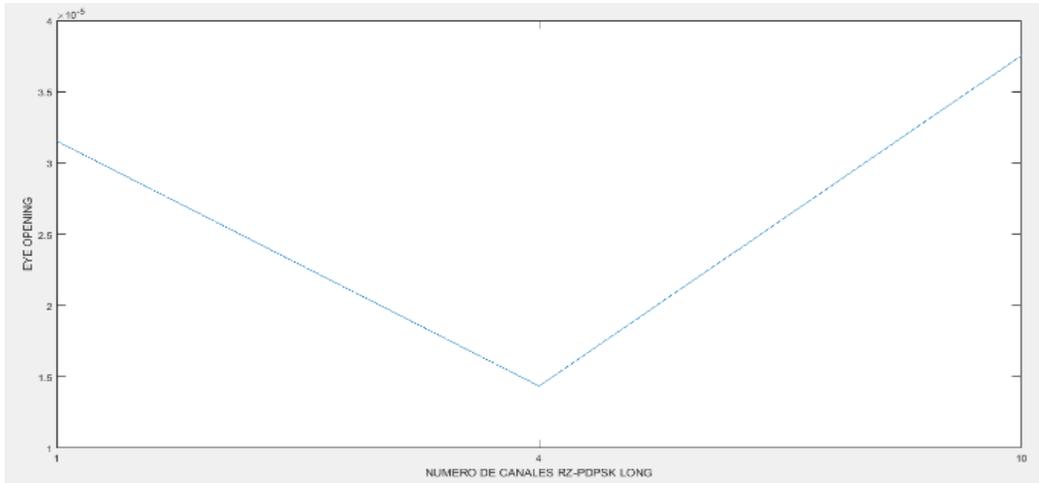


Figura 3. 17 Apertura de ojo para variaciones de longitud

Con los resultados obtenidos a partir de la comparación de la Figura 3. 17 con él B2B, se realizó la Tabla 3. 3:

A	1 canal	4 canales	10 canales
1.0 e-04	0.3154	0.1435	0.3753

Tabla 3. 3 Error de la apertura del ojo vs a las variaciones de longitud para RZ-PDPSK respecto al B2B

### 3.1.3 CASO DE ESTUDIO 3: VARIACIÓN COEFICIENTE PMD

Al realizar las simulaciones de variación de coeficiente de PMD, se tomaron de igual forma, como en los casos de estudiados anteriormente, una variación de número de canales (1, 4 y 10), por esta razón se utilizaron los mismos modelos esquemáticos.

Configurando el parámetro ALL-ORDER-PMD (AOPMD), con una longitud de 100 Km, con un coeficiente de PMD variable desde 0 a 1.1 en saltos de  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , para cada número de canales.

#### 3.1.3.1 Variaciones de DGD vs coeficiente de PMD, para 4 canales.

Por medio del componente AOPMD, se obtiene un análisis estadístico de la PMD, basado en el modelo waveplate de segmentos concatenados. Dando como resultado una DGD con respecto a cada variación del coeficiente de PMD

La variación de la DGD con respecto al coeficiente de PMD Figura 3. 18, tomada en el componente AOPMD, el cual hace una emulación de la fibra óptica, asilando todos los efectos (de primer y

## Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

segundo orden), garantizando que el análisis solo será enfocado, sobre el efecto de la PMD, sobre 4 canales.

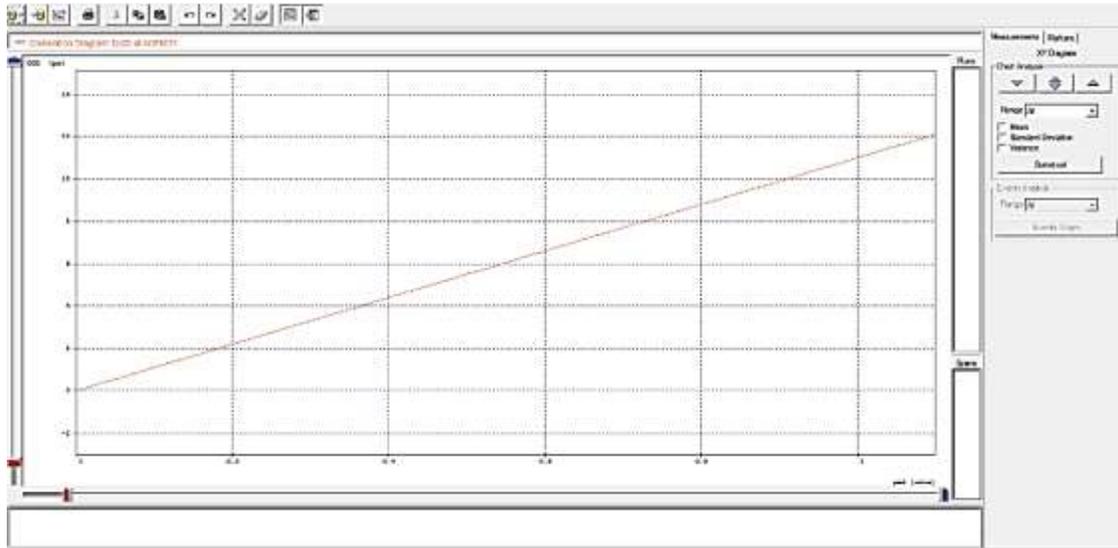


Figura 3. 18 DGD vs coeficiente de PMD, RZ-PDPSK, para 4 canales.

En la Figura 3. 19, se muestra la ampliación de la Figura 3. 18, percibiendo en la intersección encerrada en el círculo, un máximo valor de DGD, que para el caso de estudio de 4 canales, correspondiente, al valor de tolerancia máximo (por diseño), del 10% del tiempo de bit (100 ps), que sería equivalente a un DGD máximo de 10 ps. Dando como resultado Figura 3. 19, que este valor máximo se alcanzó a un valor de PMD de  $0.907708 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

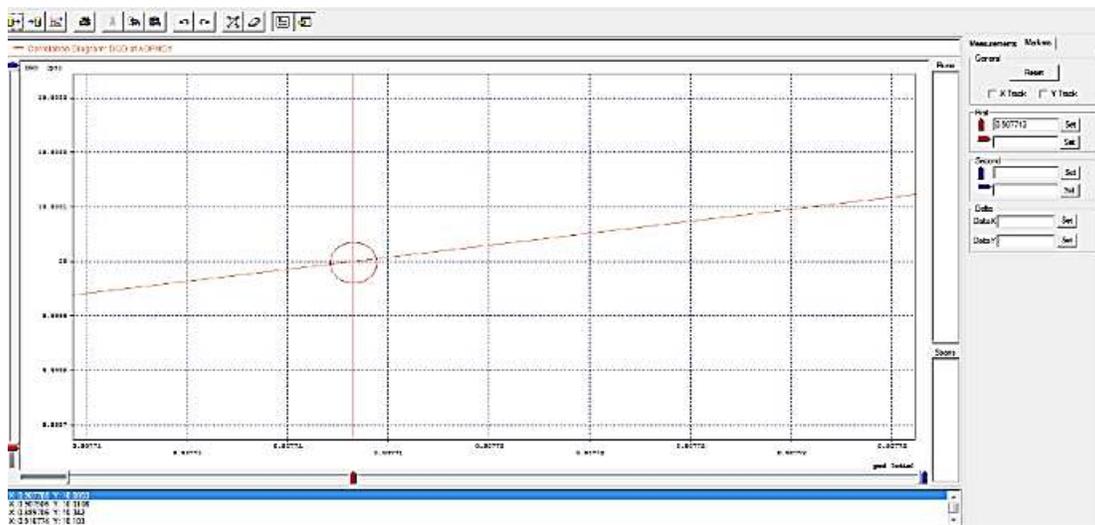


Figura 3. 19 Ampliación Figura 3. 18

La variación del factor Q, con respecto a las variaciones de coeficiente de PMD, mostrando que se obtuvieron valores óptimos, para todas las variaciones de coeficiente de PMD, mostrando una pequeña variación cerca del 1%, de las variaciones, con esto se puede concluir que PMD por sí sola no afecta el valor de Q, con respecto a la variaciones de coeficiente de PMD, para la modulación RZ-PDPSK a 4 canales.



Figura 3. 20 Factor Q vs variación coeficiente de PMD

La variación del factor BER, con respecto a las variaciones de coeficiente de PMD, mostrando que se obtuvo un valores óptimos de BER=1 e-40 dB, constante para todas las variaciones de coeficiente de PMD, con esto se puede concluir que, PMD por sí sola no afecta el valor de BER, con respecto a las variaciones de coeficiente de PMD, para la modulación RZ-PDPSK, a 4 canales.

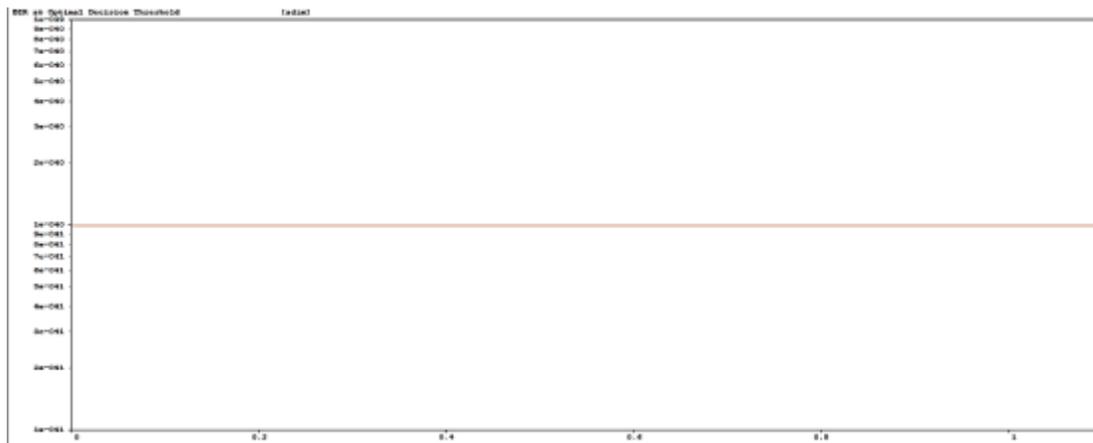


Figura 3. 21 Factor BER vs variación coeficiente de PMD

### 3.1.3.2 Variaciones de coeficientes de PMD, para 4 canales para espectro X:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en los casos anteriores, variación de número de canales y variación de longitud. Se tomaron los espectros encontrados, para cada una

de las variaciones de coeficientes de PMD, y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático, Figura 3. 22.

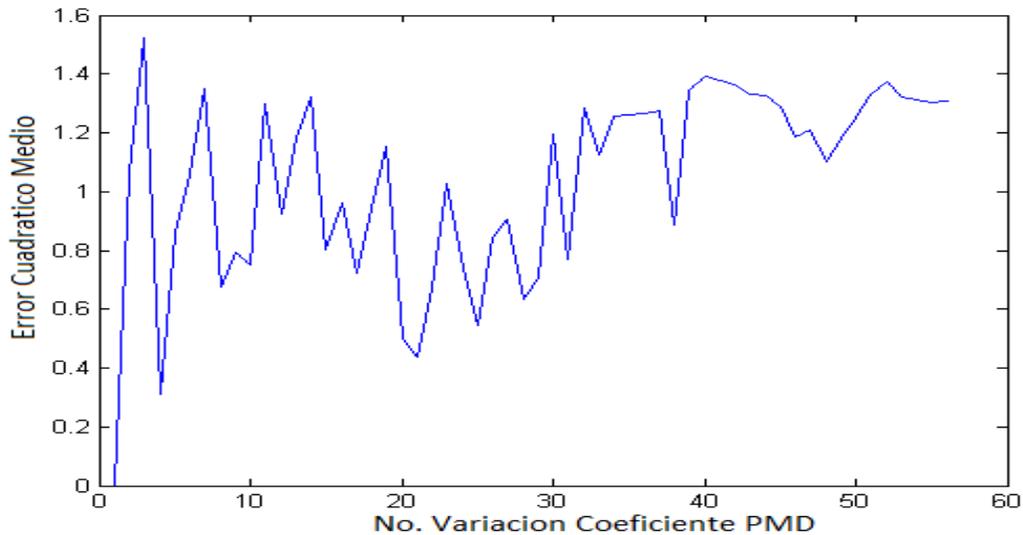


Figura 3. 22 Error medio cuadrático vs variación coeficiente de PMD, para 4 canal RZ-PDPSK. Espectro en X

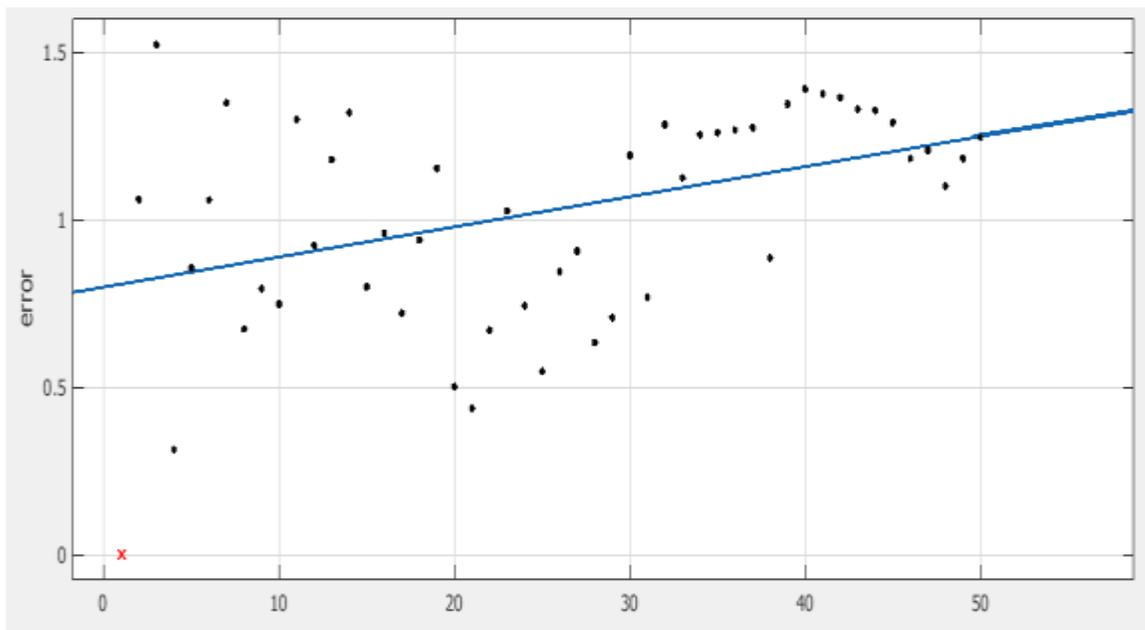


Figura 3. 23 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación coeficiente de PMD, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del error cuadrático con respecto al coeficiente de PMD, para este caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1=0.009001$ .

### 3.1.3.3 Variaciones de coeficientes de PMD, para 4 canales para espectro Y:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en X de la variación de longitudes para 1, 4 y 10 canales, se tomaron los espectros encontrados, para cada una de variaciones del coeficiente de PMD y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático, mostrado en la Figura 3. 24.

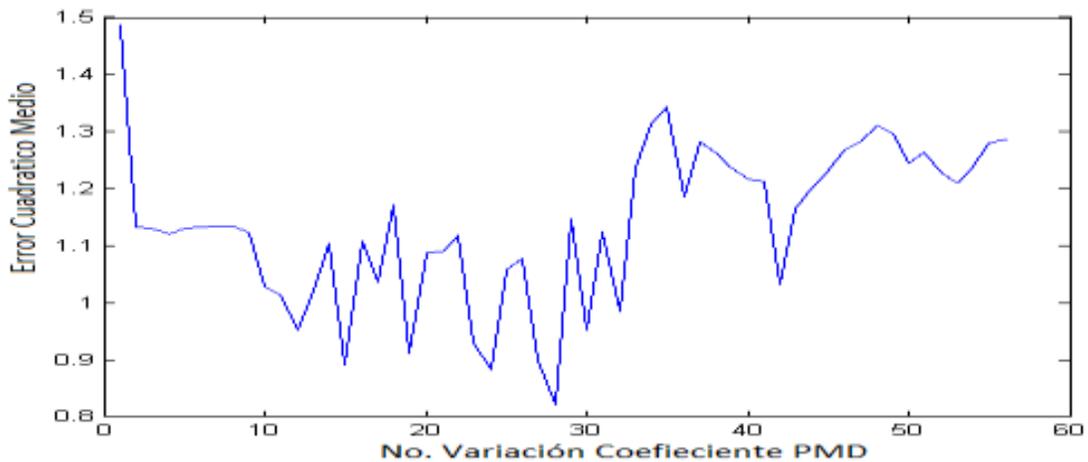


Figura 3. 24 Error medio cuadrático vs variación del coeficiente de PMD, para 4 canal RZ-PDPSK. Espectro en Y

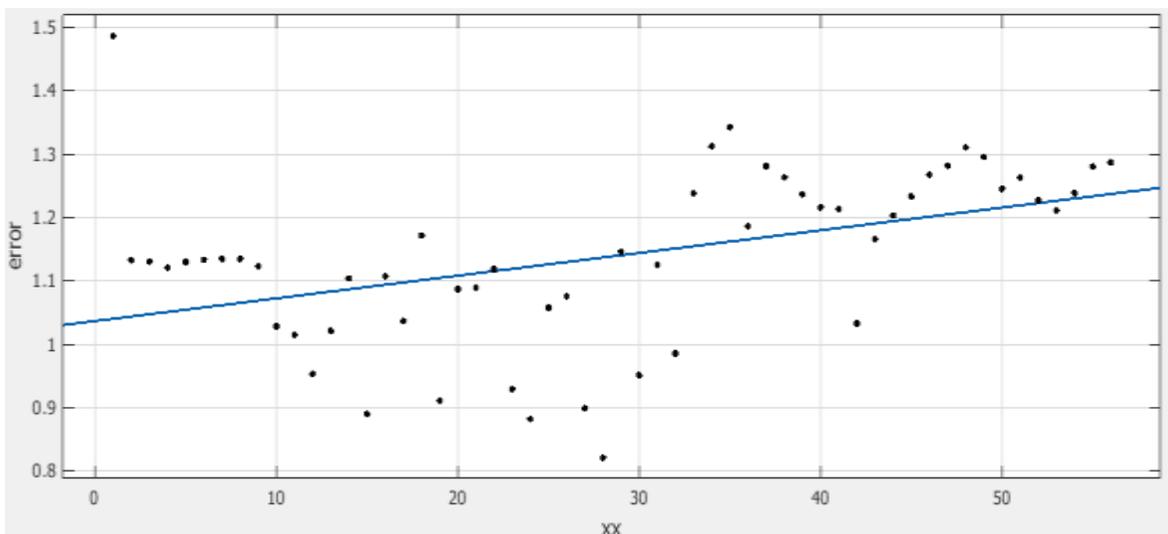


Figura 3. 25 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación de coeficiente de PMD, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del error cuadrático con respecto al coeficiente de PMD, para este caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1=0.003579$ .

Las variaciones obtenidas de la apertura del ojo Figura 3. 26, para los diferentes de valores de coeficiente de PMD, para 1, 4 y 10 canales, aunque en la gráfica se muestra que para 4 canales hay un cambio considerable, en el resultado del error con respecto al valor de la apertura de ojo del B2B, se puede ver que hay una similitud entre los valores para 1 y 10 canales, siendo este último importante por la cantidad de información que lleva, además siendo 10 canales, el número de canales más apropiado para una red DWDM, debido a que se disminuye el costo de trasmisión por bit.

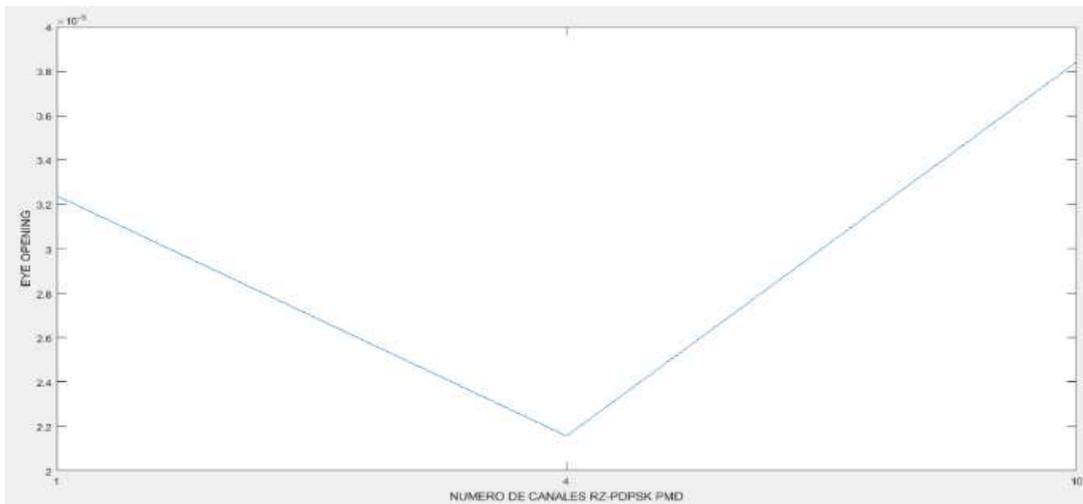


Figura 3. 26 Apertura de ojo para variaciones de coeficiente de PMD

Con los resultados obtenidos a partir de la comparación de la Figura 3. 26 con el B2B, se realizó la Tabla 3. 4:

A	1 canal	4 canales	10 canales
1.0 e-04	0.3239	0.2157	0.3841

Tabla 3. 4 Error de la apertura del ojo con vs a las variaciones de coeficiente de PMD para RZ-PDPSK respecto al B2B

### 3.1.4 CASO DE ESTUDIO 4: “ESCENARIO REAL DE SIMULACIÓN”

En la Figura 3. 27, se muestra el esquemático, para una modulación RZ-PDPSK. usado para las simulaciones de caso real, para 10 canales ópticos, debido a que comercialmente es más común encontrar que se trabaja a este número de canales, con el fin de disminuir el costo por bit, utilizando de una mejor manera el espectro.

Para la realizar las simulaciones de escenario real se configuraron las frecuencias de transmisión de 193.1 THz a 194.0 THz, con un espaciamento de 100 GHz, de igual forma, se tuvieron en cuenta los efectos de la dispersión cromática, para esto se colocó un compensador en configuración balanceado, y tal como se encuentra en la referencia [32], se redujo el efecto de la dispersión cromática, suficientemente con el fin de asegurar, que los efectos observados son los de la PMD, la longitud del enlace se configuro a 100 Km, debido a que esta distancia es un valor típico de los enlaces, además se implementó una fibra mono modo Corning smf28e, amplificadores EDFA, debido a que este es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad, ya que es posible amplificar señales en la tercera ventana (1550nm), la configuración de bombeo que se estableció fue la Dual. Fibras DCF para compensar la CD para poder medir con seguridad el efecto de la PMD sobre el formato de modulación y el canal óptico

Para determinar el valor de la distancia a utilizar en los tramos de fibra DCF, se realizó una simulación, en la que se encuentra el valor de distancia optimo, con respecto a los parámetros de desempeño Q y BER.

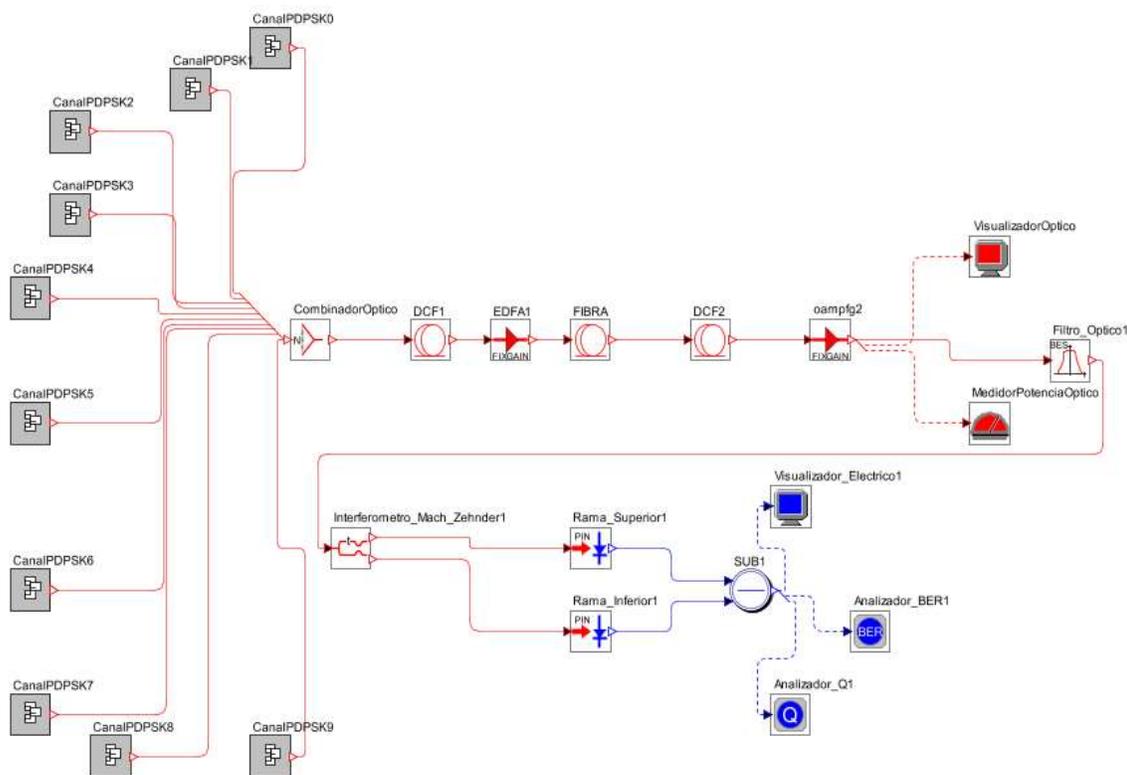


Figura 3. 27 Esquemático Escenario real RZ-PDPSK

Las variaciones de BER vs DCF y Q vs DCF, respectivamente, donde se consideraron las variaciones de coeficiente de PMD en la fibra smf28e de 0 a 1.1 similar a los realizados en casos anteriores, obteniendo los valores máximos de BER y de Q, respectivamente, cuando la DCF tiene un valor de

10 ps.Km/nm, debido a este resultado, para estas simulaciones se configura el valor de la DCF=10 ps.Km/nm.

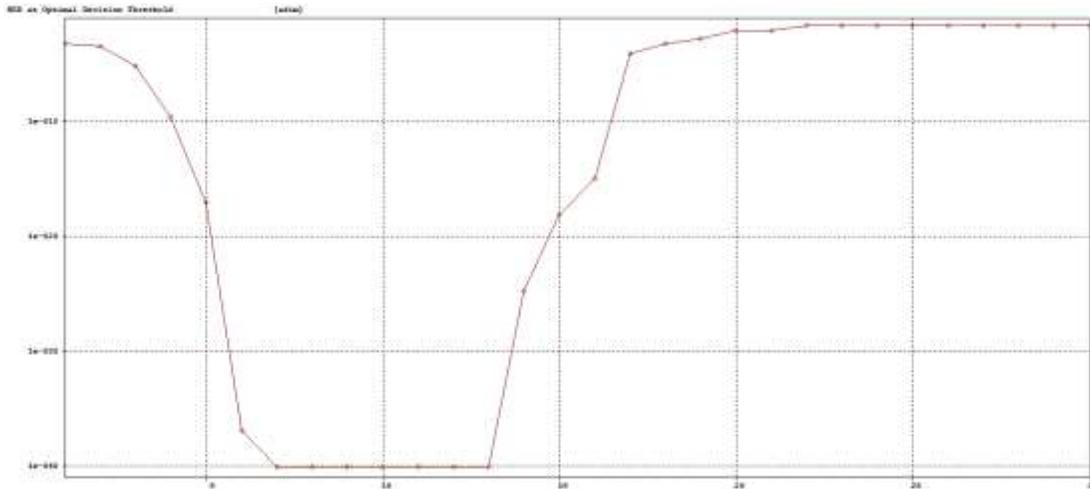


Figura 3. 28 Variación BER vs DCF

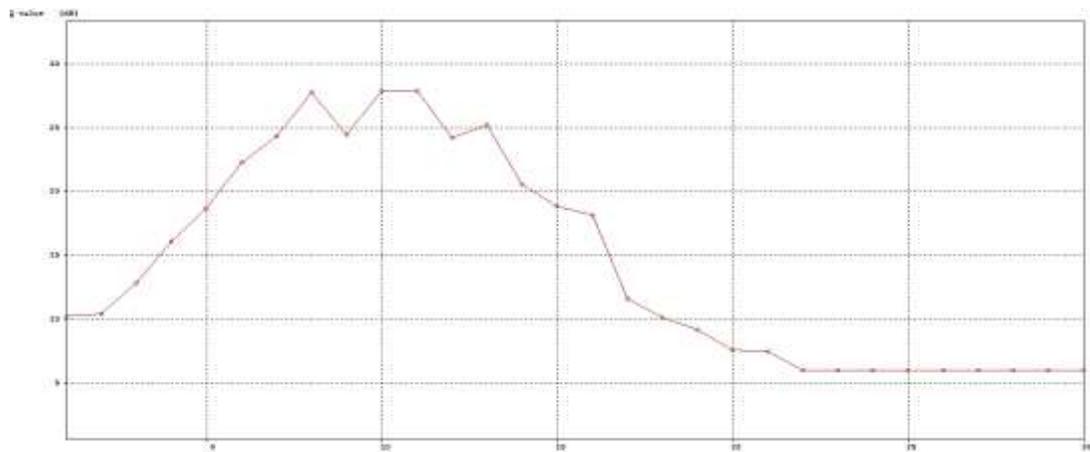


Figura 3. 29 Variación Q vs DCF

Se realiza un análisis, a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, anteriormente mostradas, utilizando los archivos (casos-PDPSK-AOPMD-(long, pmd) para 1, 4, 10 canales)<sup>6</sup> generados por el simulador. Ya que la PMD, afecta de manera distinta a las componente X e Y del espectro, se tienen en cuenta estos casos para el análisis del efecto de la PMD sobre las modulaciones y los canales ópticos.

Los resultados obtenidos de la DGD vs las variaciones del coeficiente de PMD, para RZ-PDPSK, las variaciones de coeficiente de PMD de 0 a 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  y las variaciones de PMD de 0 a 1,1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ,

---

<sup>6</sup> Anexos encontrados en la carpeta Anexos – Casos, cd del proyecto de grado

aumentando el valor de las variaciones de coeficiente de PMD, para encontrar el límite de DGD, propuesto en la teoría, que es de 10 ps.

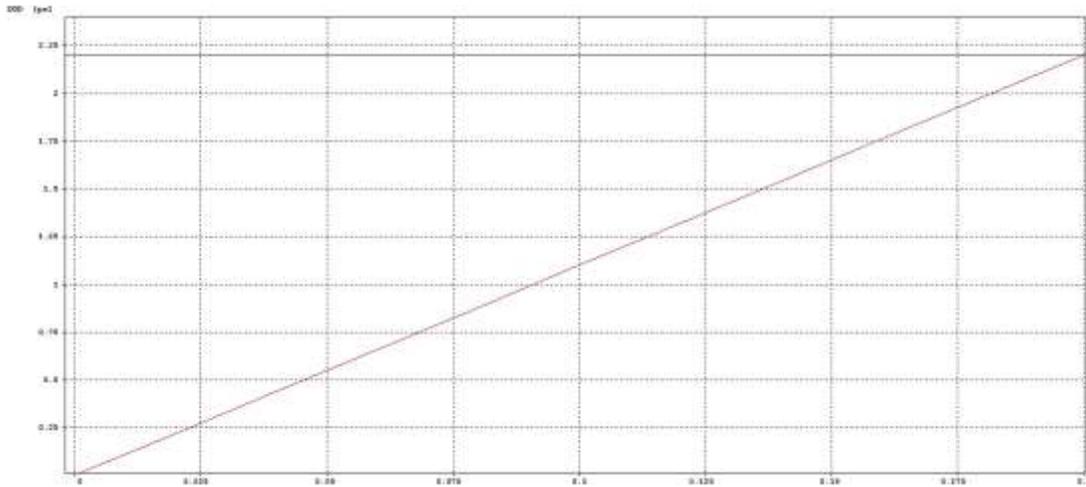


Figura 3. 30 DGD vs variaciones coeficiente PMD (0-0.2) para RZ-PDPSK

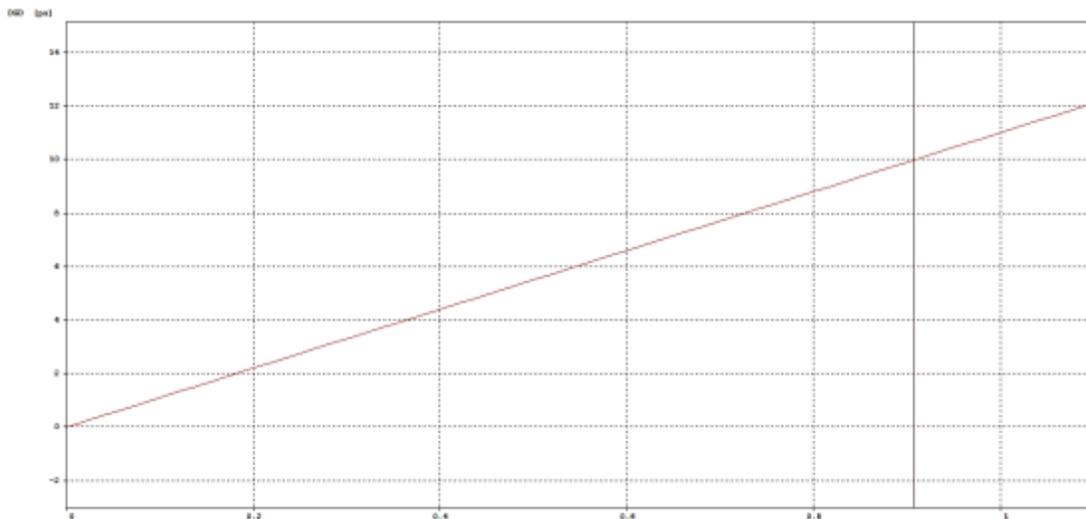


Figura 3. 31 DGD vs variaciones coeficiente PMD (0-1.1) para RZ-PDPSK

Para encontrar la medida del cambio del espectro óptico, se hace un análisis a través del error cuadrático medio, utilizando la ecuación 3.1, mostrado en la Figura 3. 32 y Figura 3. 34, para el espectro X e Y, respectivamente, encontrando que las pendientes negativas nos representan que el efecto de la PMD sobre la señal, no es distorsivo, sino al contrario se comporta como un efecto compensatorio del efecto residual de la CD.

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

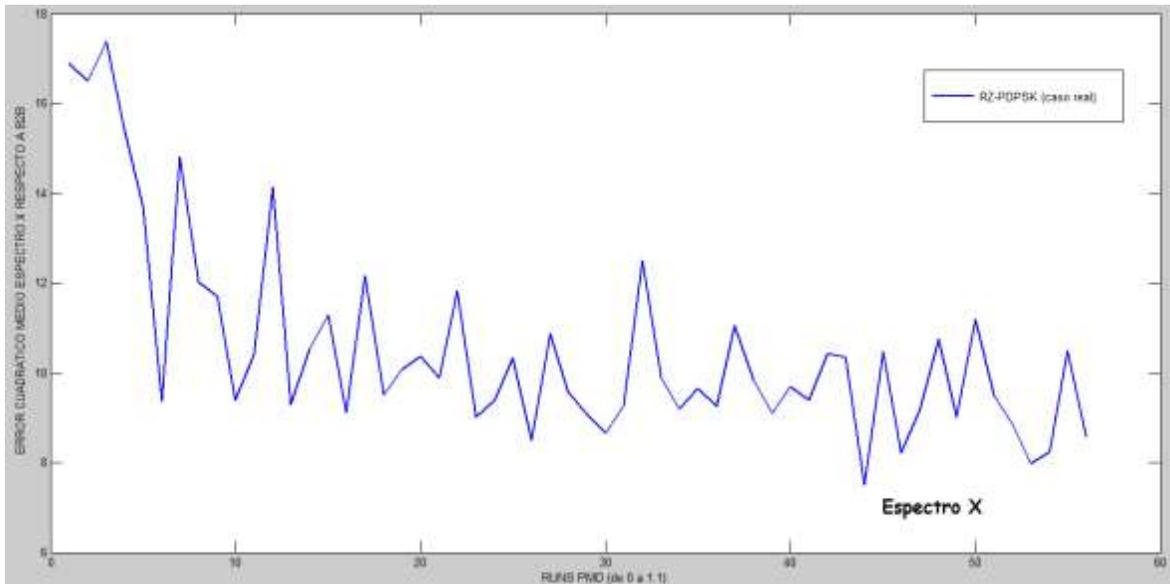


Figura 3. 32 Error en espectro X

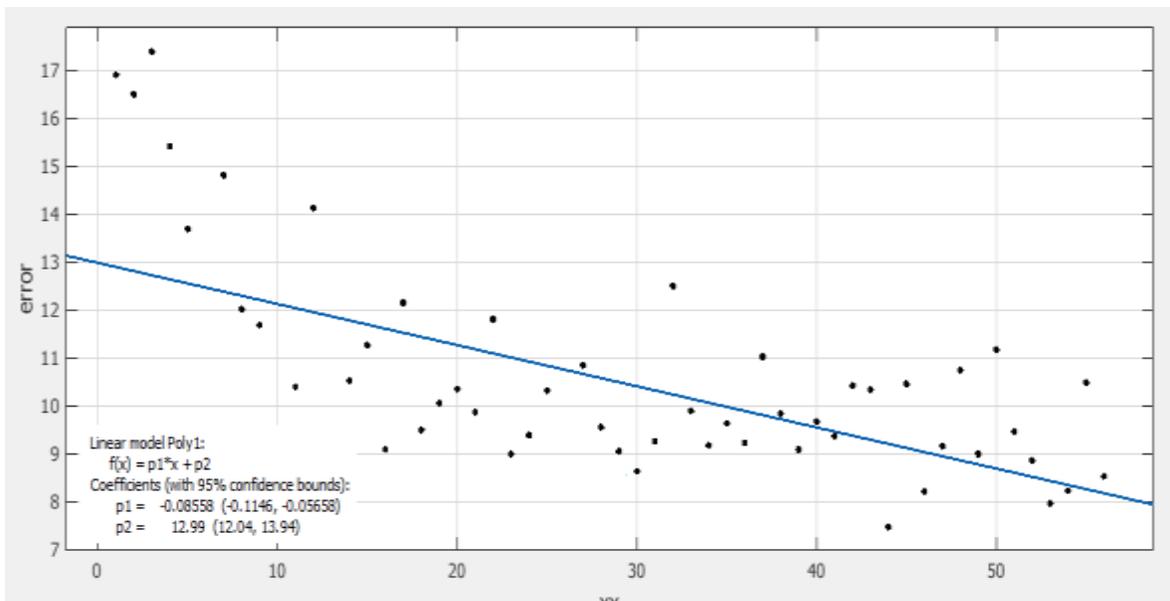


Figura 3. 33 Regresión lineal del error medio cuadrático en el espectro X

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

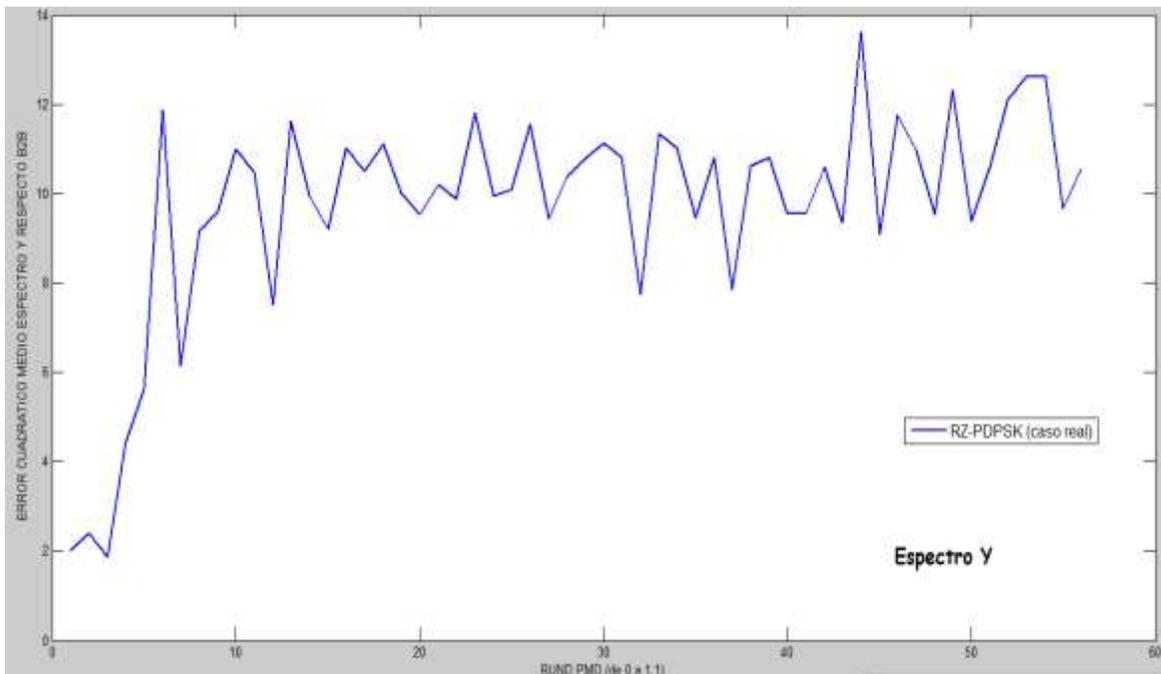


Figura 3. 34 Error en espectro Y

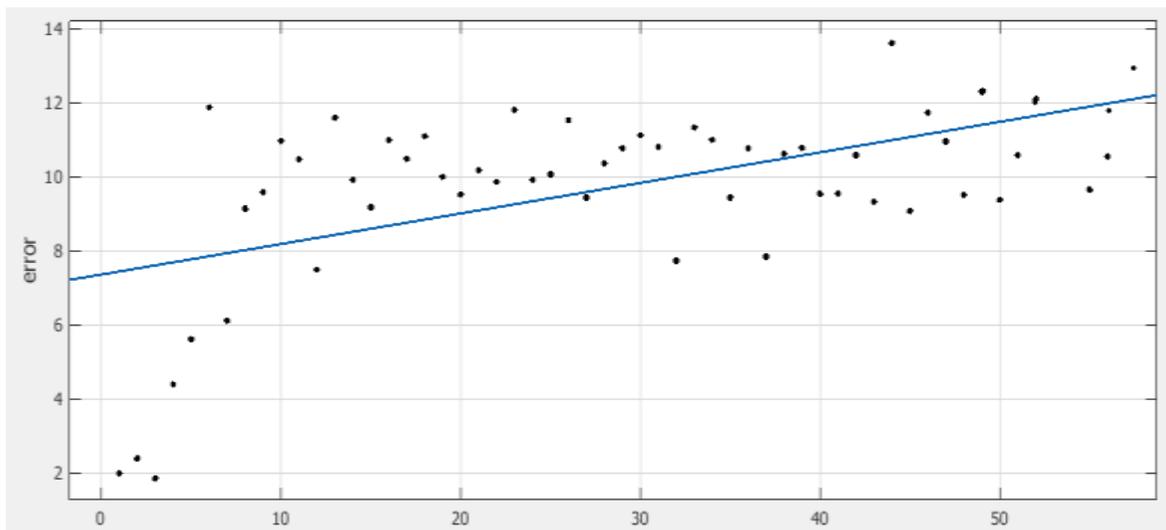


Figura 3. 35 Regresión lineal del error medio cuadrático en el espectro Y

Las variaciones obtenidas de coeficiente de PMD vs Q y PMD vs BER, respectivamente, donde se obtienen valores por encima de los valores óptimos especificados para este estudio.

## Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

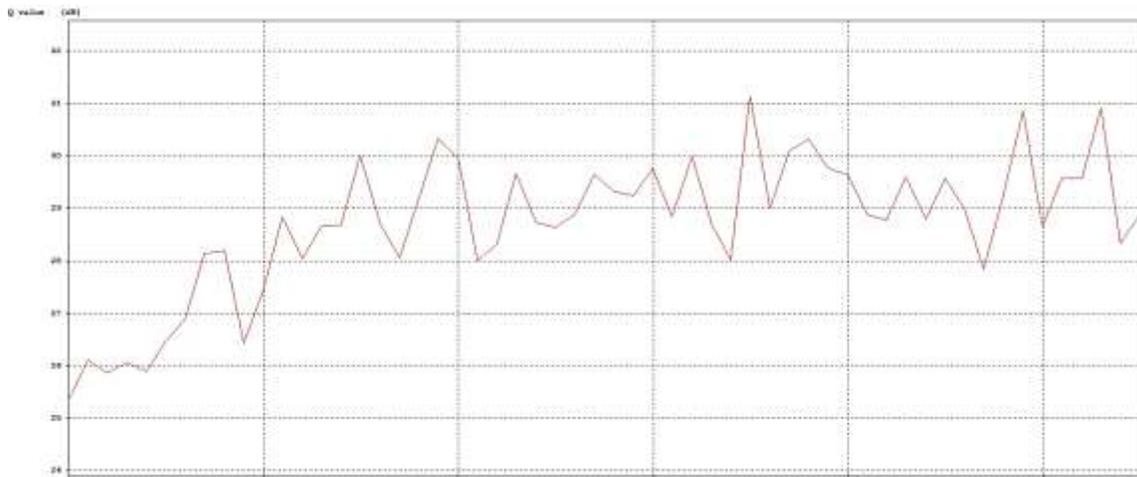


Figura 3. 36 Variación Q vs coeficiente de PMD

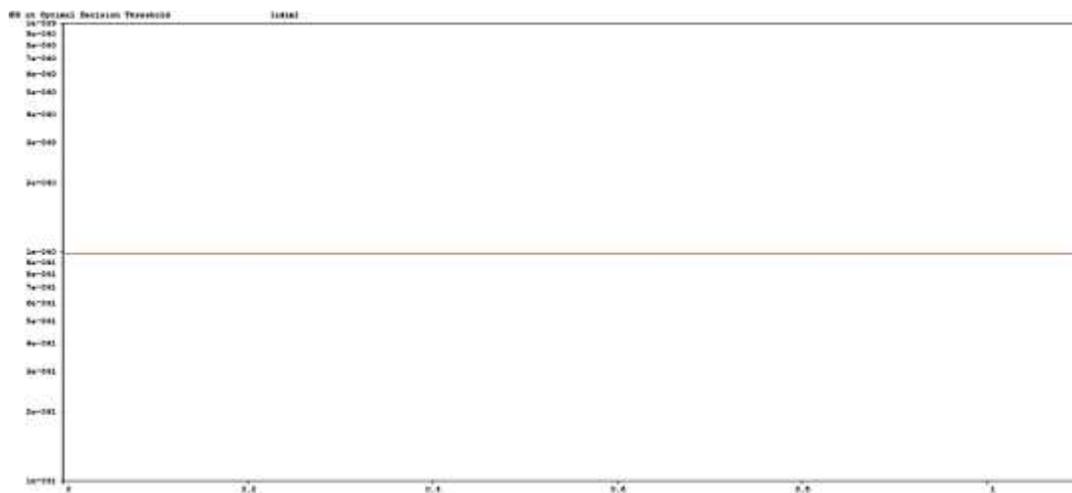


Figura 3. 37 Variación BER vs coeficiente de PMD

Las variaciones obtenidas de potencia de recepción vs coeficiente de PMD, encontrando que la PMD no tiene efecto significativo en la potencia de recepción.

## Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

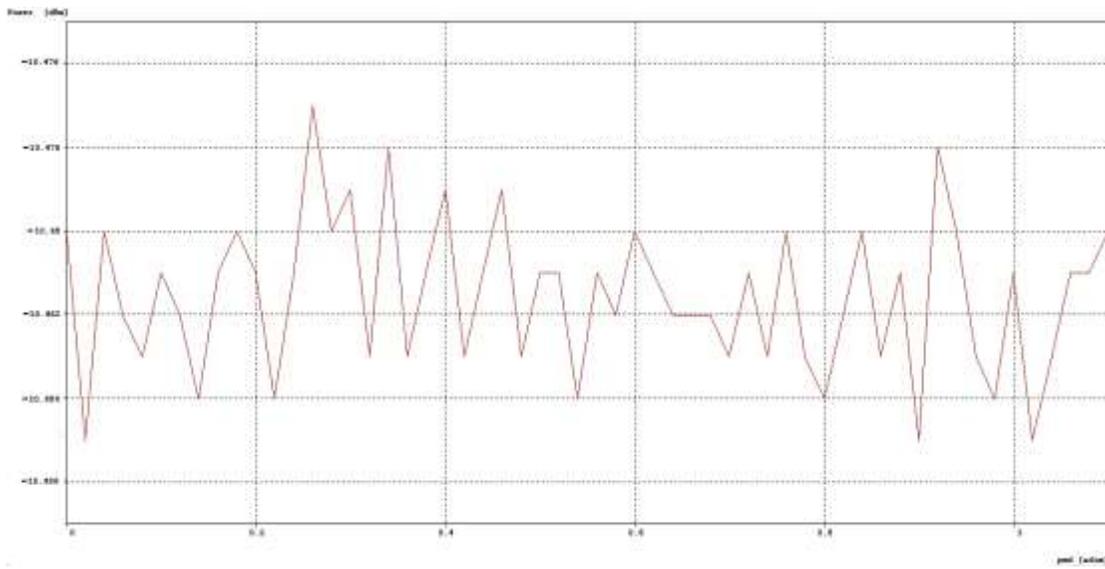


Figura 3. 38 variaciones de potencia de recepción vs coeficiente de PMD

Se encontró que la señal eléctrica, visualizándola en una ventana de tiempo predeterminada de 0.5 ns, que la forma de la señal no sufría variaciones importantes, pero se presentaban delays, entre valores sucesivos de PMD. Usando los archivos <sup>7</sup> que se generan de cada variación de coeficiente de PMD, en el simulador, y basándonos en el valor de un máximo del caso B2B (correspondiente a cada escenario) de la señal en la ventana temporal de visualización, se pudo determinar el tiempo en que este se produce.

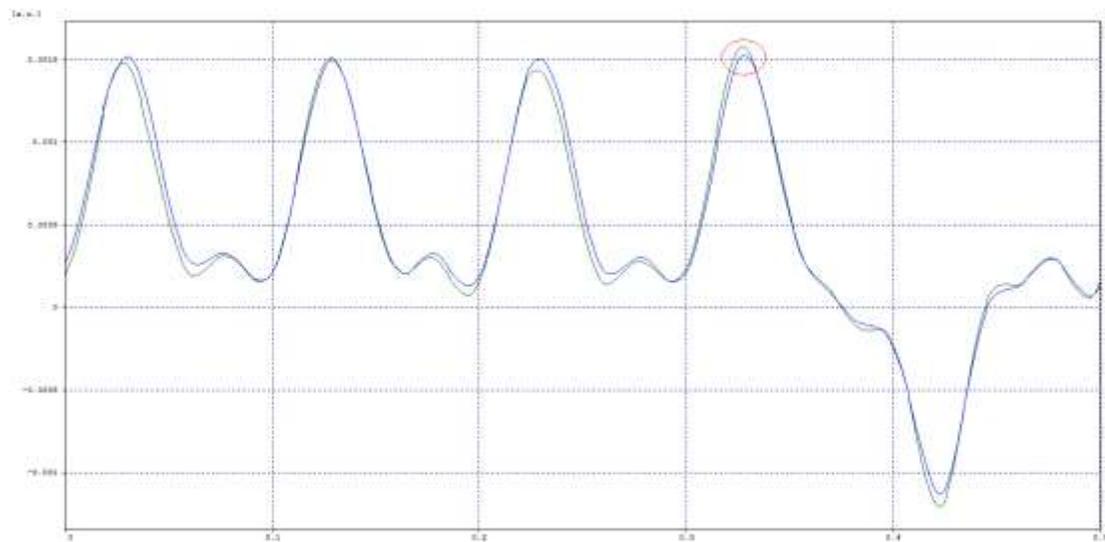


Figura 3. 39 Señal eléctrica a la salida del receptor RZ-PDPSK

<sup>7</sup> Archivos encontrados en la carpeta Anexos- Delays, del cd del proyecto

En la Figura 3. 39, la curva verde corresponde al caso B2B, la curva azul corresponde a una variación de coeficiente de PMD, y utilizando los valores encontrados de la parte de la gráfica encerrados en el círculo, donde se encuentran los valores picos de cada una de la curvas, los cuales fueron usados para determinar el desfase temporal o delay, tomando el caso B2B correspondiente como referencia.

A partir de los resultados anteriores, se encontraron cada uno de los delays, obteniendo la Figura 3. 40.

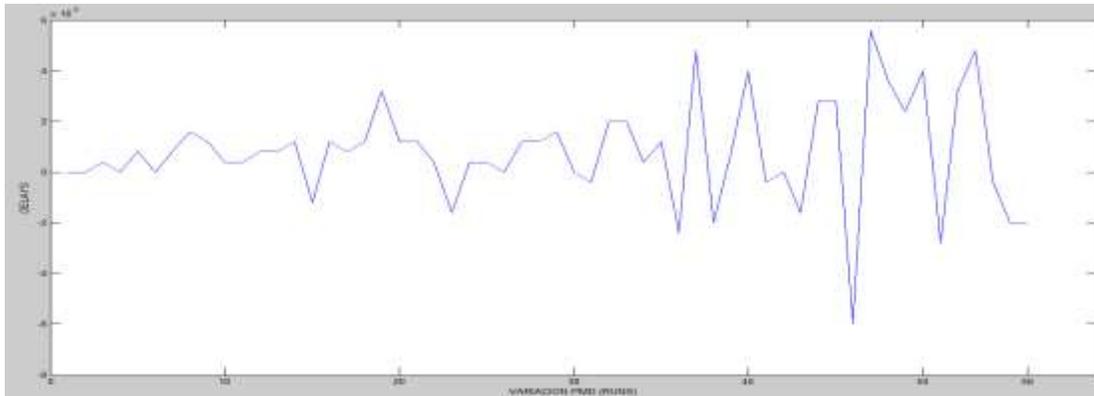


Figura 3. 40 Delays para cada variación de coeficiente de PMD para RZ-PDPSK

Mediante el uso de la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab, se realizó una regresión lineal de la Figura 3. 40, obteniendo la Figura 3. 41. En donde el parámetro de la pendiente es de importancia debido a que nos da el peso de la variación específica.

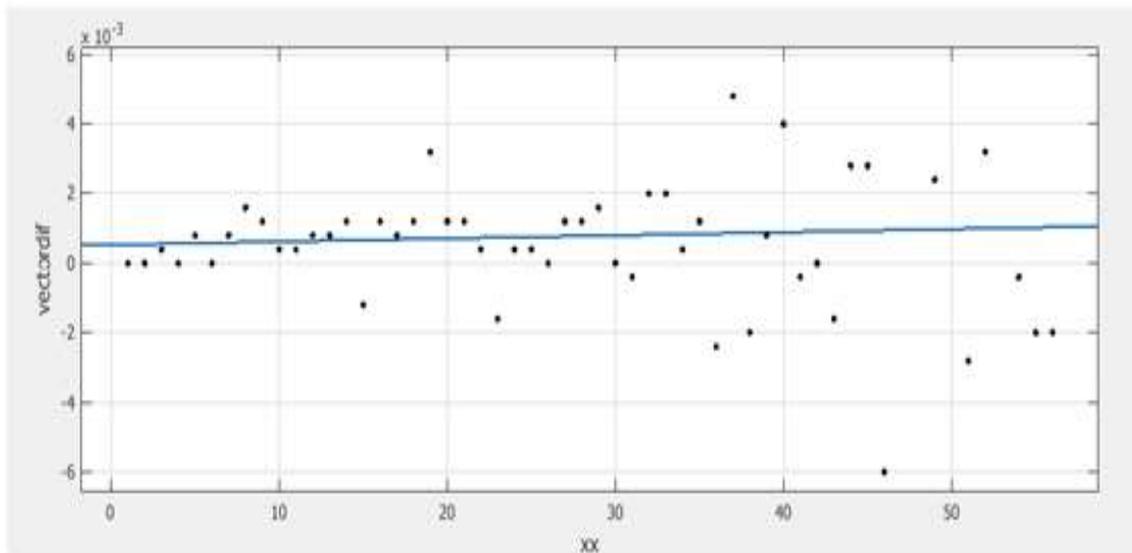


Figura 3. 41 Regresión lineal delays vs variaciones de coeficiente de PMD RZ-PDPSK

## 3.2 ESCENARIO 2: RZ-DQPSK

### 3.2.1 CASO DE ESTUDIO 1: VARIACIÓN NÚMERO DE CANALES

En las Figura 3. 42, Figura 3. 43 y Figura 3. 44, se muestra los esquemáticos, usados para las simulaciones de variación de número de canales para 1, 4 y 10 canales, respectivamente, para una modulación RZ-DQPSK

Para la realizar las simulaciones de variación de número de canales, se configuró el bloque ALL-ORDER-PMD (AOPMD), con un coeficiente de PMD de  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  y una longitud de 100 km (valores típicos, utilizados en los enlaces).

Para realizar la simulación de variación de número de canales, para 1 canal, es estableció una frecuencia de emisión centrada en 193.1 THz.

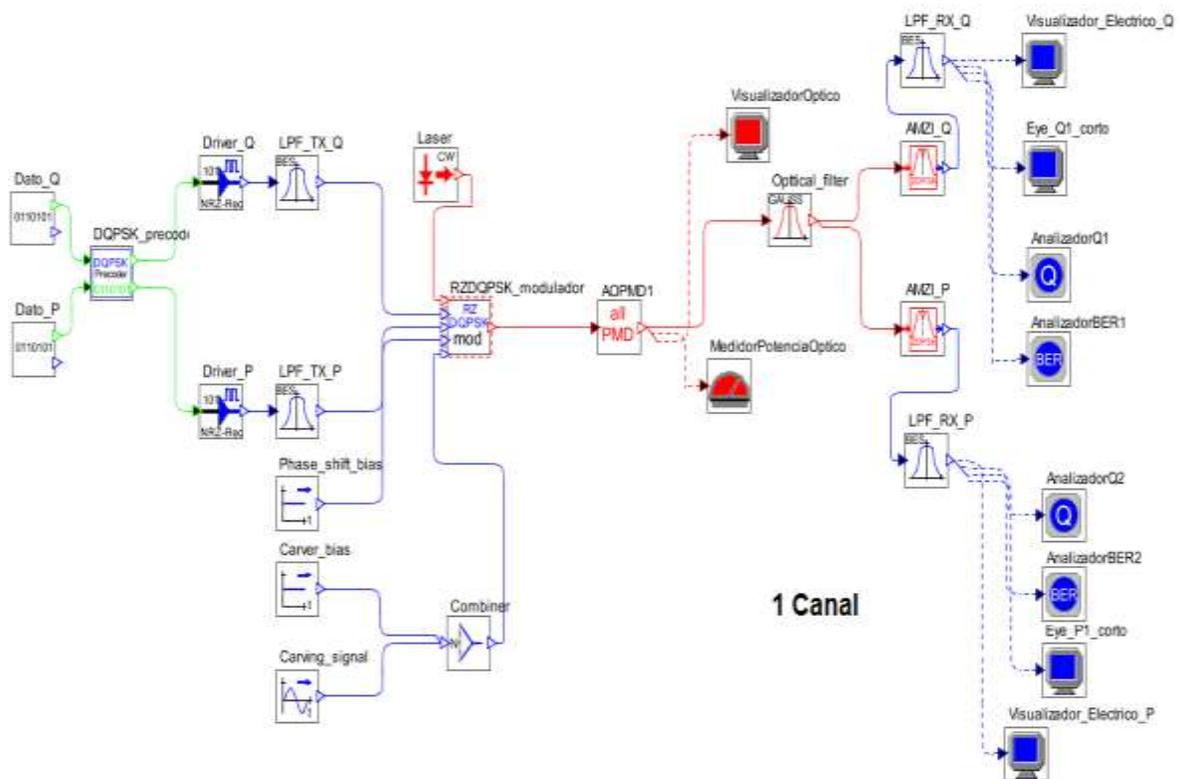


Figura 3. 42 RZ-DQPSK para 1 canal

Para realizar la simulación de variación de número de canales, para 4 canales, es establecieron frecuencias de emisión centradas en 193.1 THz, 193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz, para cada canal, respectivamente.

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

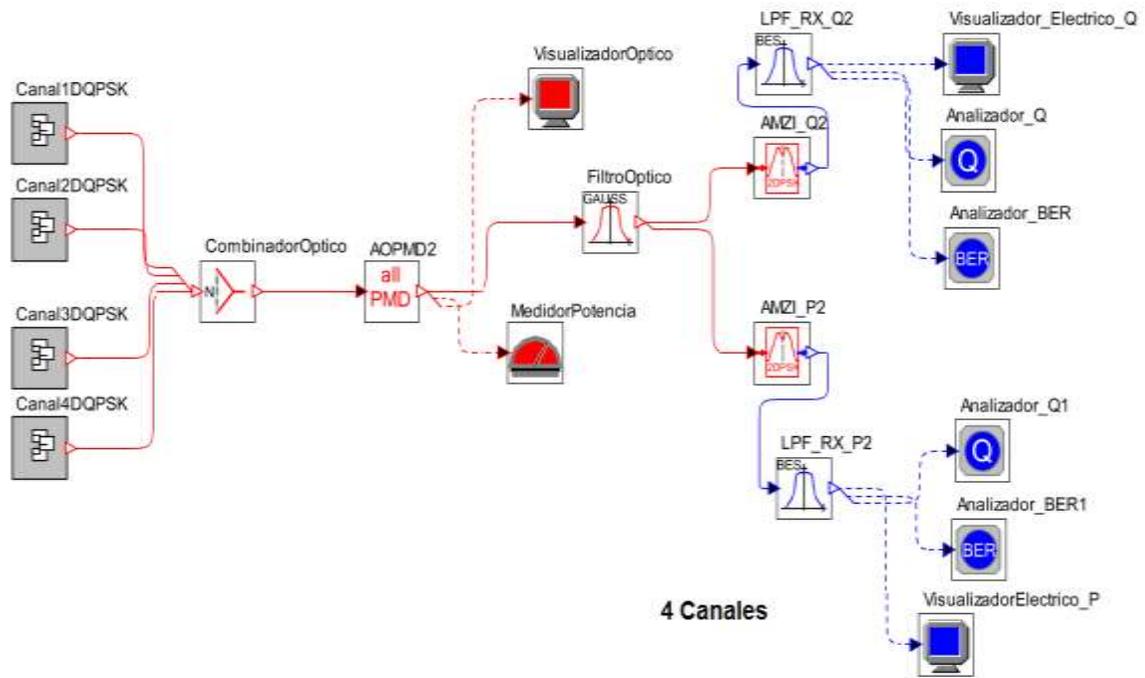


Figura 3. 43 RZ-DQPSK para 4 canales

Para realizar la simulación de variación de número de canales, para 10 canales, se establecieron frecuencias de emisión centradas en 193.1 THz, 193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz, 193.5 THz, 193.6 THz, 193.7 THz, 193.8 THz, 193.9 THz, 194.0 THz para cada canal, respectivamente.

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

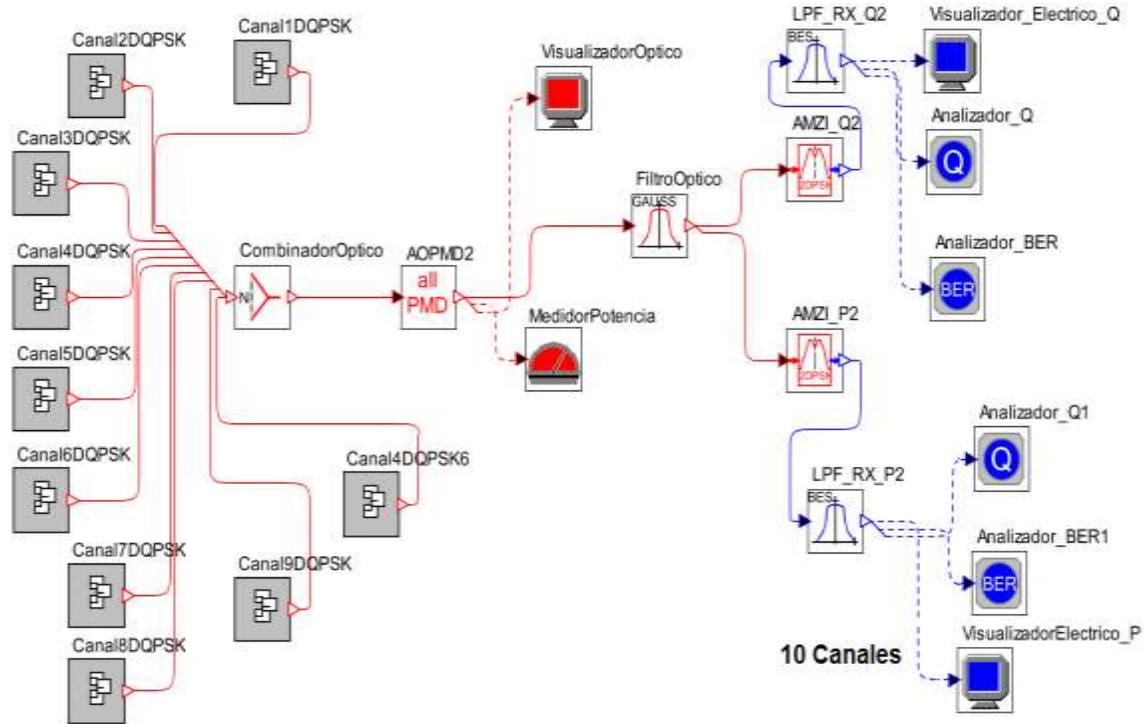


Figura 3. 44 RZ-DQPSK para 10 canales

El análisis de la variación de canales, tiene sentido en el análisis del espectro, antes del filtrado específico de canal, ya que después de este filtro solo se hace el análisis de un canal, perdiendo la información acumulada del efecto de la PMD, sobre el espectro.

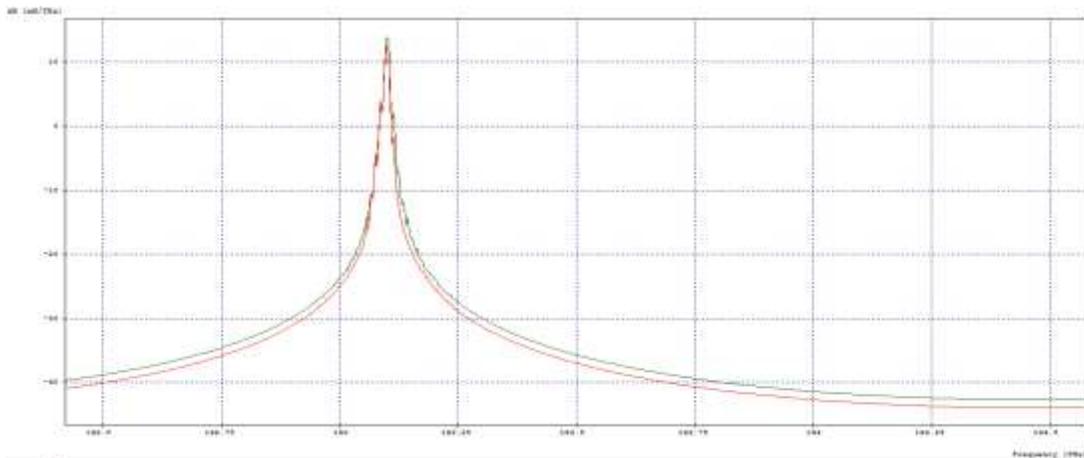


Figura 3. 45 Espectro Óptico RZ-DQPSK para 1 canal

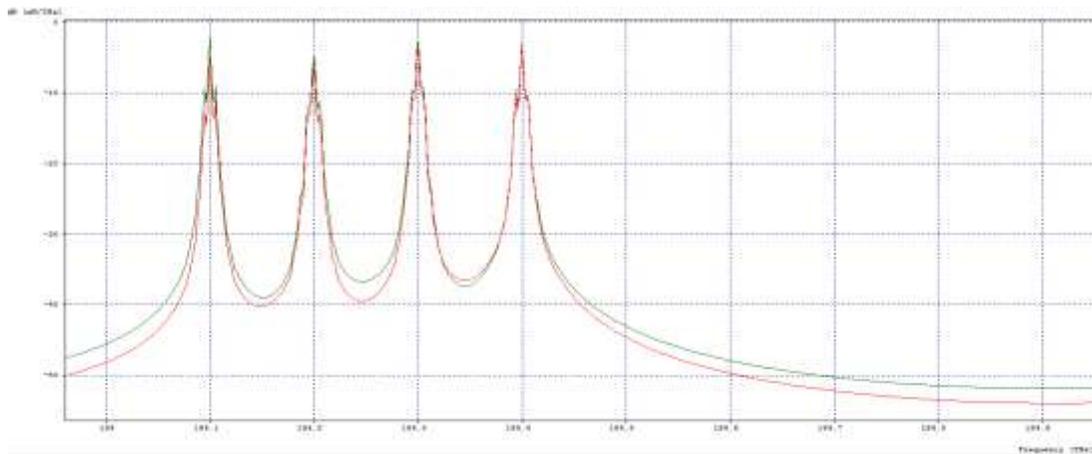


Figura 3. 46 Espectro Óptico RZ-DQPSK para 4 canales

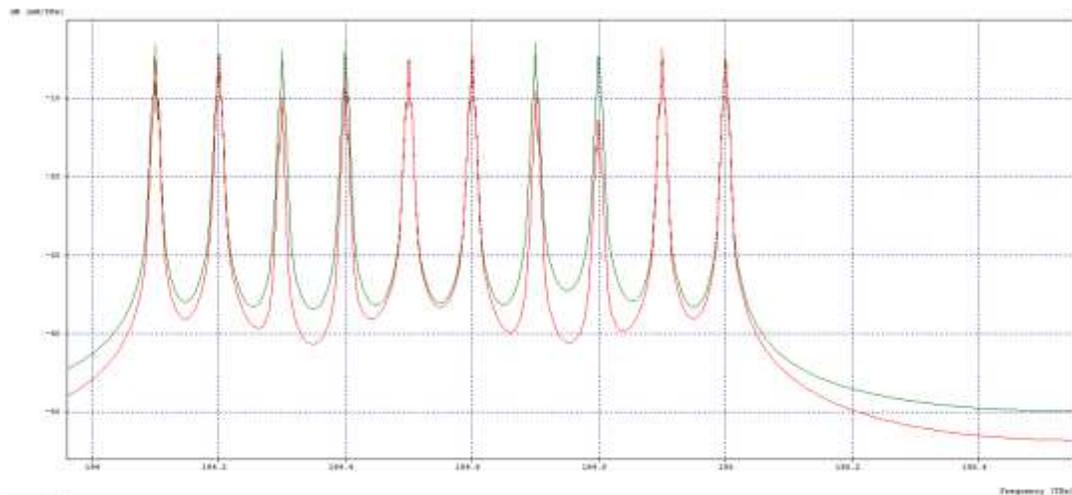


Figura 3. 47 Espectro Óptico RZ-DQPSK para 10 canales

Se realiza un análisis, a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, anteriormente mostradas, utilizando los archivos (casos-DQPSK-AOPMD-(long, pmd) para 1, 4, 10 canales)<sup>8</sup> generados por el simulador. Ya que la PMD, afecta de manera distinta a las componente X e Y del espectro, evidenciado en las Figura 3. 45, Figura 3. 46, Figura 3. 47, se tienen en cuenta estos casos para el análisis del efecto de la PMD sobre la variación del número de canales.

Para encontrar la medida del cambio del espectro óptico, para cada uno de los casos anteriores, se hace un análisis por medio del error cuadrático medio, utilizando la ecuación 3.1.

---

<sup>8</sup> Anexos encontrados en la carpeta Anexos – Casos, cd del proyecto de grado

Con la implementación de la ecuación 3.1, se obtuvo la siguiente Tabla 3. 5:

No. Canales	Espectro	Error
1	X	4.8797
1	Y	4.3709
4	X	1.0642
4	Y	0.2006
10	X	1.5906
10	Y	0.2342

Tabla 3. 5 Errores vs No. de canales espectro RZ-DQPSK

Encontrando, a partir de los resultados obtenidos en la Tabla 3. 5, que hay una menor perturbación en el espectro Y, a comparación de los valores obtenidos del espectro X.

### 3.2.2 CASO DE ESTUDIO 2: VARIACIÓN LONGITUD

Al realizar las simulaciones de variación de longitud, se tomaron de igual forma, como en el caso de estudio anterior, una variación de número de 4 canales<sup>9</sup>, por esta razón se utilizaron los mismos modelos esquemáticos.

Configurando el parámetro ALL-ORDER-PMD (AOPMD), con un coeficiente de PMD de  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  y una variación de longitud de 0km hasta 6000 km, con variaciones de longitud de 100 km por tramo, para cada número de canales.

#### 3.2.2.1 Variaciones de DGD vs longitud, para 4 canales.

Por medio del componente AOPMD, se obtiene un análisis estadístico de la PMD, basado en el modelo waveplate de segmentos concatenados. Dando como resultado una DGD con respecto a las variaciones de cada longitud.

La variación de la DGD con respecto a la longitud Figura 3. 48, tomada en el componente AOPMD, el cual hace una emulación de la fibra óptica, asilando todos los efectos (de primer y segundo orden), garantizando que el análisis solo será enfocado, sobre el efecto de la PMD, sobre 4 canales.

---

<sup>9</sup> Las variaciones de longitudes para 1 y 10 canales se pueden visualizar en el documento de Anexos- A en el cd del

## Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

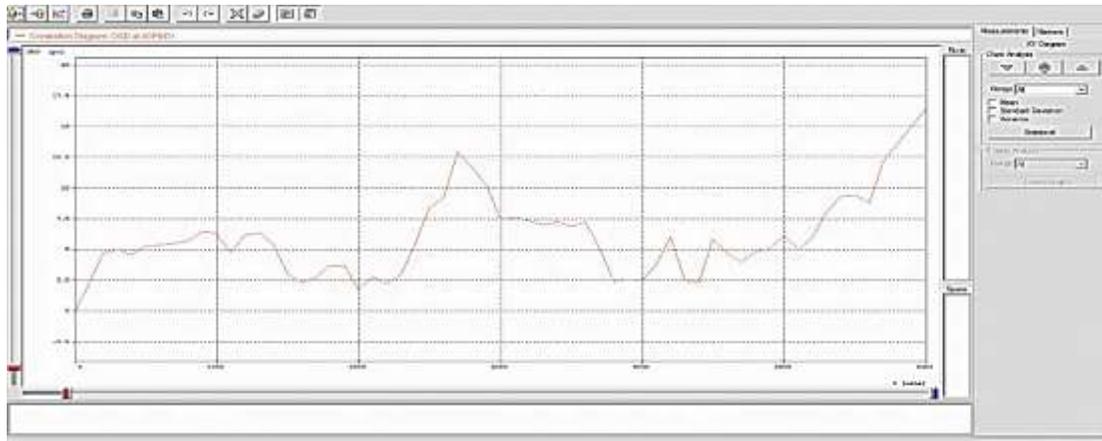


Figura 3. 48 DGD vs Longitud RZ-DQPSK, para 4 canales

En la Figura 3. 49, se muestra la ampliación de la Figura 3. 48, percibiendo en la intersección encerrada en el círculo, un máximo valor de DGD, que para el caso de estudio, correspondiente, al valor de tolerancia máximo (por diseño), del 10% del tiempo de bit (100 ps), que sería equivalente a un DGD máximo de 10 ps. Dando como resultado en la Figura 3. 49, que este valor máximo se alcanzó a una longitud de 2620.18 Km, pero teniendo en cuenta que en una aplicación real no es posible alcanzar esa distancia con un enlace de fibra óptica, sin tener de por medio amplificadores y/o regeneradores de señal.

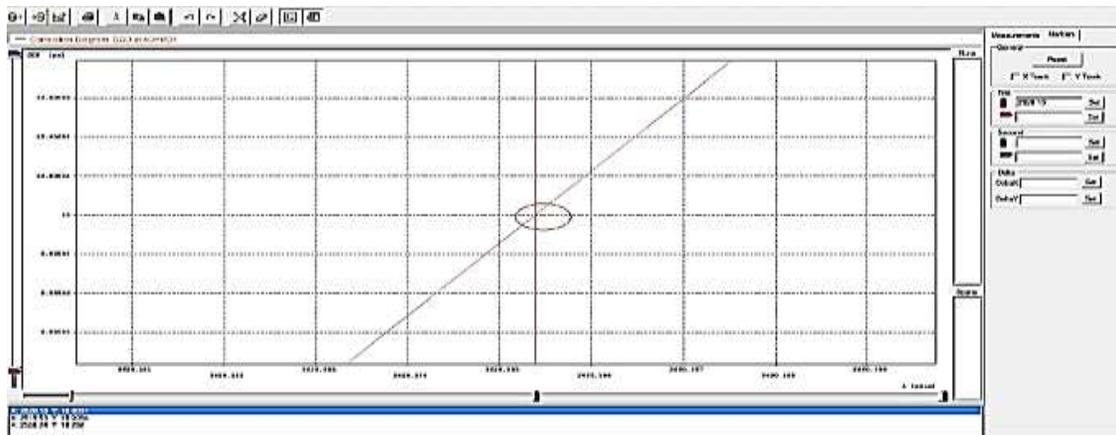


Figura 3. 49 Ampliación Figura 3. 48

La variación del factor Q, con respecto a las variaciones de longitud, mostrando que se obtuvieron valores óptimos, para todas estas variaciones, con una pequeña variación cerca del 1% en algunas variaciones, con esto se puede concluir que PMD por sí sola no afecta el valor de Q, con respecto a la variación de longitud, para la modulación RZ-DQPSK a 4 canales.

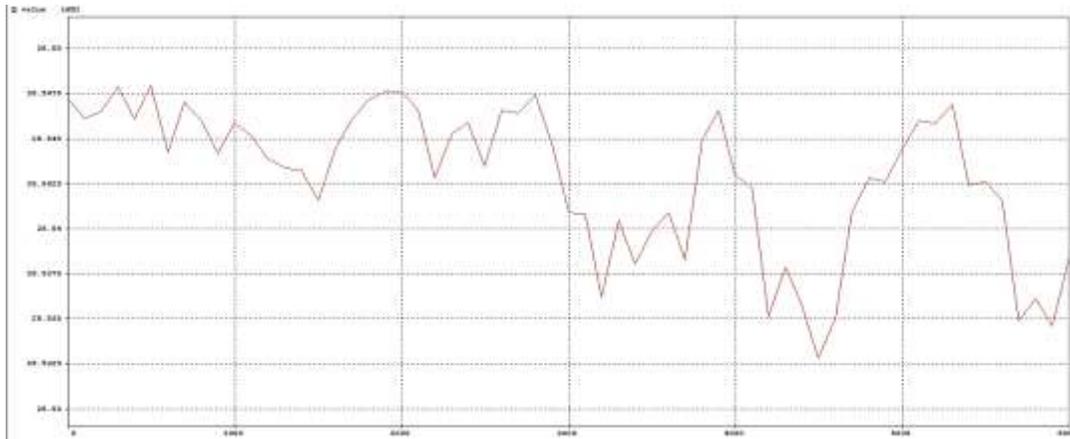


Figura 3. 50 Factor Q vs variación de longitud

La variación del factor BER, con respecto a las variaciones de longitud, mostrando que se obtuvo un valor de BER=1 e-40 dB, constante para todas las variaciones de longitud, con esto, se puede concluir que, PMD por sí sola no afecta en mayor medida, el valor de BER, con respecto a la variación de longitud, para la modulación RZ-DQPSK a 4 canales.

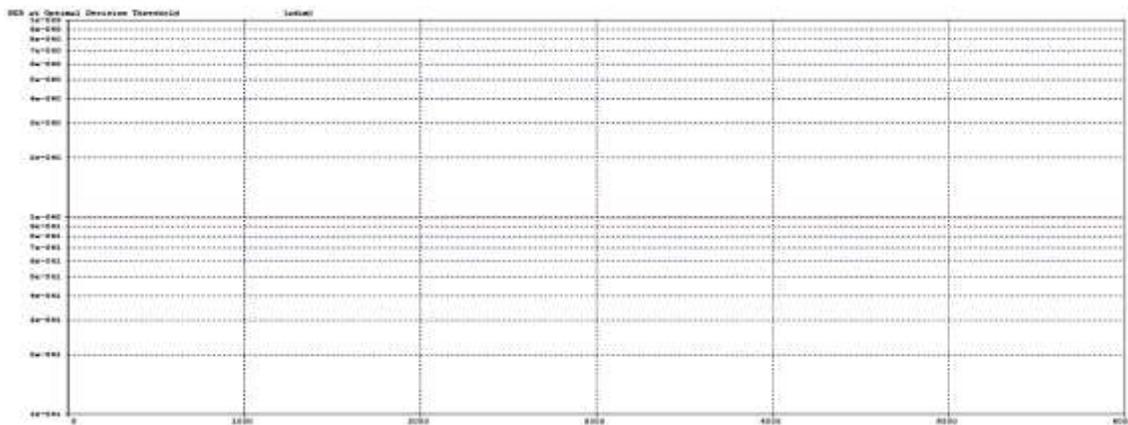


Figura 3. 51 Factor BER vs variación de longitud

### 3.2.2.2 Variaciones de longitudes para 4 canales para espectro X:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en el caso de variación de número de canal. Se tomaron los espectros encontrados, para cada una de las longitudes que se variaron y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático Figura 3. 52, con el fin de encontrar una tendencia de la variación del efecto de la distorsión del espectro óptico de la señal, causado por el efecto de la PMD.

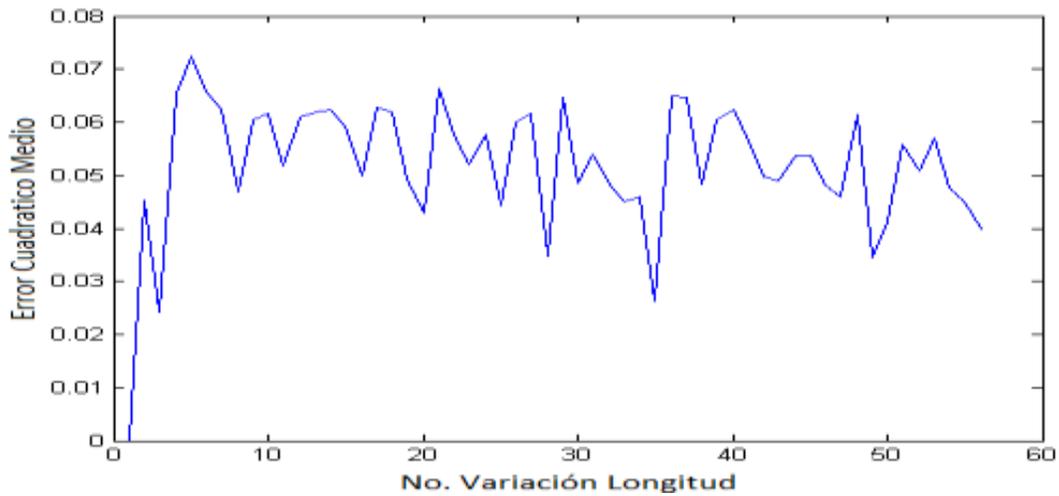


Figura 3. 52 Error medio cuadrático vs variación de longitud para 4 canal RZ-DQPSK. Espectro en X

Mediante el uso de la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab, se realizó una regresión lineal de la Figura 3. 52, obteniendo la Figura 3. 53.

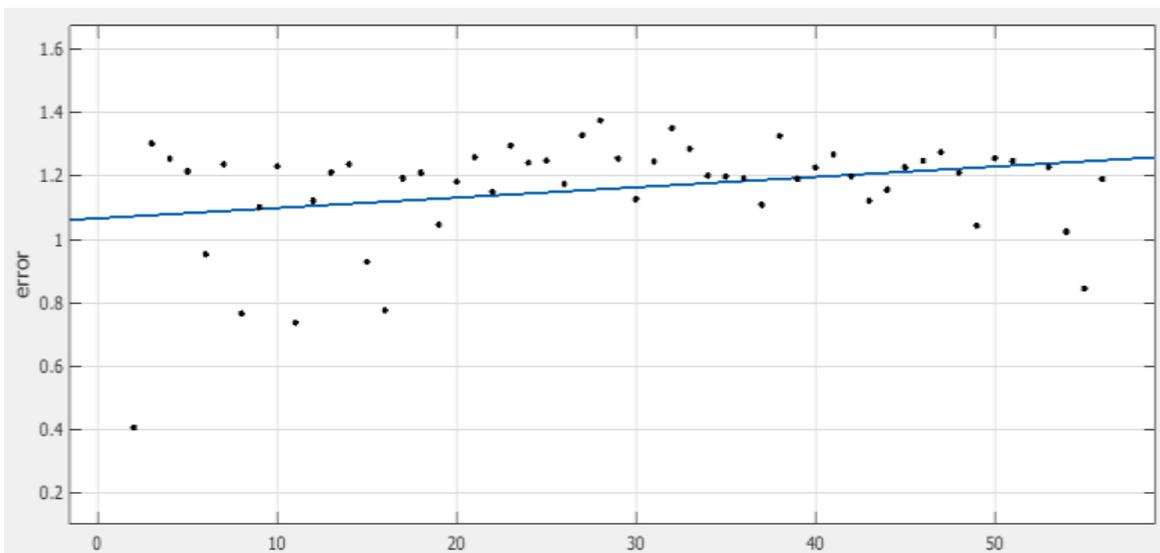


Figura 3. 53 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación de longitud, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del error cuadrático con respecto a la longitud, para este caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1 = -0.000173$ .

### 3.2.2.3 Variaciones de longitudes para 4 canales para espectro Y:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en X de la variación de longitudes, se tomaron los espectros encontrados, para cada una de las longitudes que se variaron y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático Figura 3. 54.

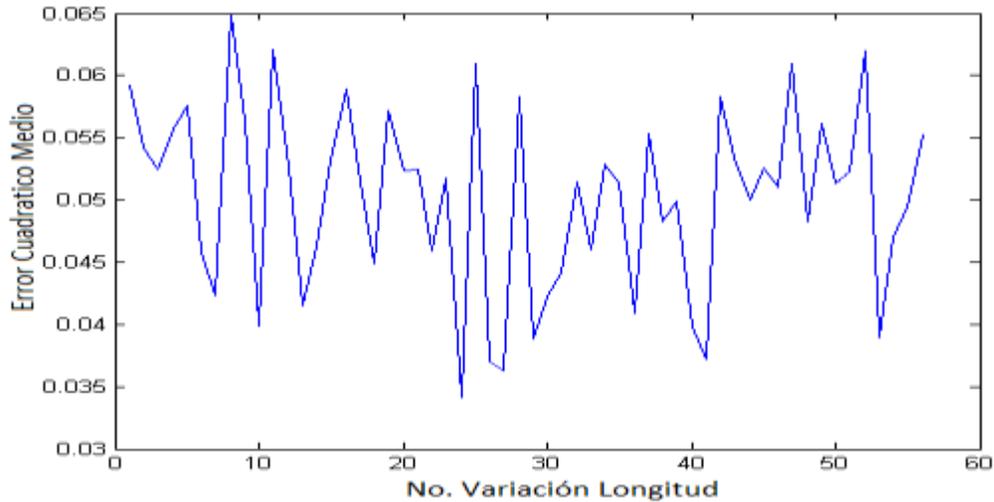


Figura 3. 54 Error medio cuadrático vs variación de longitud para 4 canal RZ-DQPSK. Espectro en Y

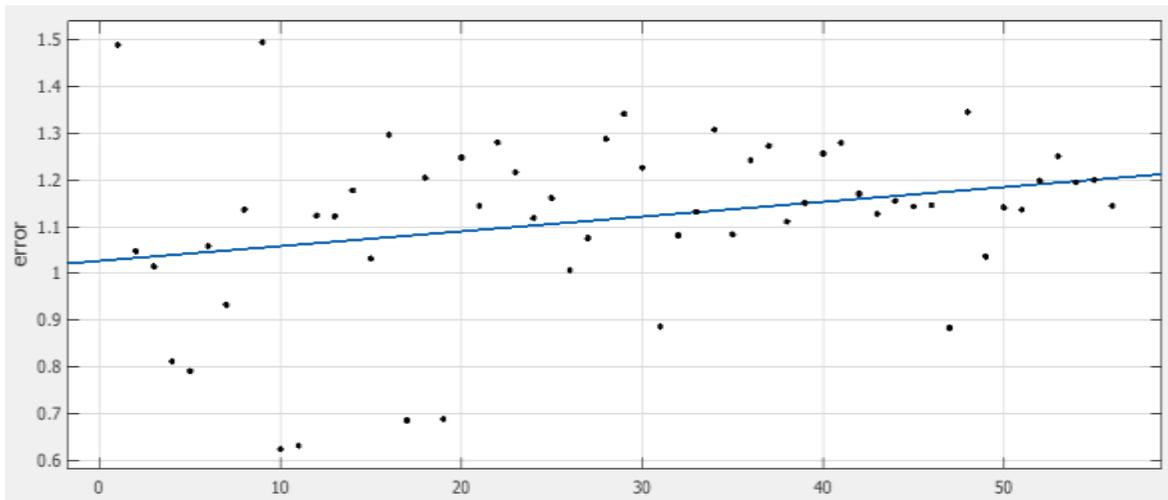


Figura 3. 55 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación de longitud, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del error cuadrático con respecto a la longitud, para este caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1 = -4.099e-5$ .

Se obtuvieron las variaciones de la apertura del ojo Figura 3. 56, para los diferentes valores de longitud, para 1, 4 y 10 canales, aunque en la gráfica se muestra que para 4 canales hay un cambio

considerable, en el resultado del error con respecto al valor de la apertura de ojo del B2B, se puede ver que hay una similitud entre los valores para 1 y 10 canales, siendo este último importante por la cantidad de información que lleva, además siendo 10 canales, el número de canales más apropiado para una red DWDM.

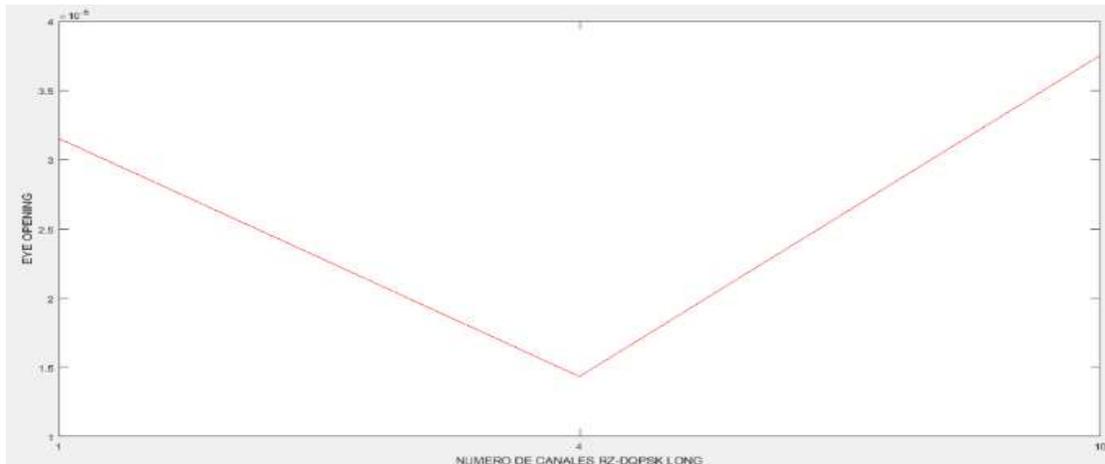


Figura 3. 56 Apertura de ojo para variaciones de longitud

Con los resultados obtenidos a partir de la comparación de la Figura 3. 56 con él B2B, se realizó la Tabla 3. 6:

A	1 canal	4 canales	10 canales
<b>1.0 e-04</b>	0.3154	0.1435	0.3753

Tabla 3. 6 Error de la apertura del ojo con vs a las variaciones de longitud para RZ-DQPSK respecto al B2B

### 3.2.3 CASO DE ESTUDIO 3: VARIACIÓN COEFICIENTE PMD

Al realizar las simulaciones de variación de coeficiente de PMD, se tomaron de igual forma, como en los casos estudiados anteriormente, una variación de número de canales (1, 4 y 10), por esta razón se utilizaron los mismos modelos esquemáticos.

Configurando el parámetro ALL-ORDER-PMD (AOPMD), con una longitud de 100 Km, con un coeficiente de PMD variable desde 0 a 1.1 en saltos de  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , para cada número de canales.

#### 3.2.3.1 Variaciones de DGD vs coeficiente de PMD, para 4 canales.

Por medio del componente AOPMD, se obtiene un análisis estadístico de la PMD, basado en el modelo waveplate de segmentos concatenados. Dando como resultado una DGD con respecto a cada variación del coeficiente de PMD.

## Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

La variación de la DGD con respecto al coeficiente de PMD Figura 3. 57, tomada en el componente AOPMD, el cual hace una emulación de la fibra óptica, asilando todos los efectos (de primer y segundo orden), garantizando que el análisis solo será enfocado, sobre el efecto de la PMD, sobre 4 canales.

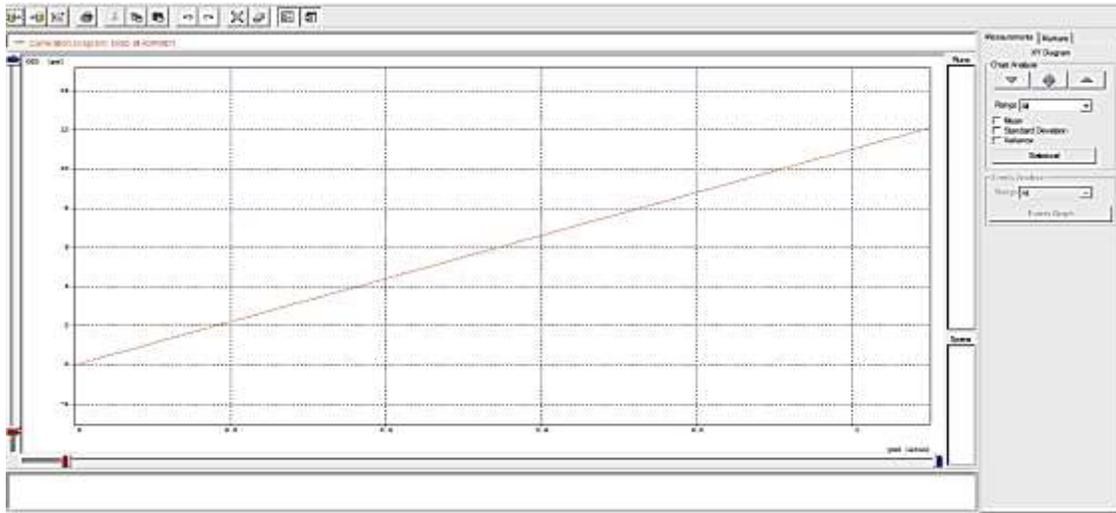


Figura 3. 57 DGD vs coeficiente de PMD, RZ-DQPSK, para 4 canales.

En la Figura 3. 58, se muestra la ampliación de la Figura 3. 57, percibiendo en la intersección encerrada en el círculo, un máximo valor de DGD, que para el caso de estudio de 4 canales, correspondiente, al valor de tolerancia máximo (por diseño), del 10% del tiempo de bit (100 ps), que sería equivalente a un DGD máximo de 10 ps. Dando como resultado en la Figura 3. 58, que este valor máximo se alcanzó a un valor de PMD de  $0.907708 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

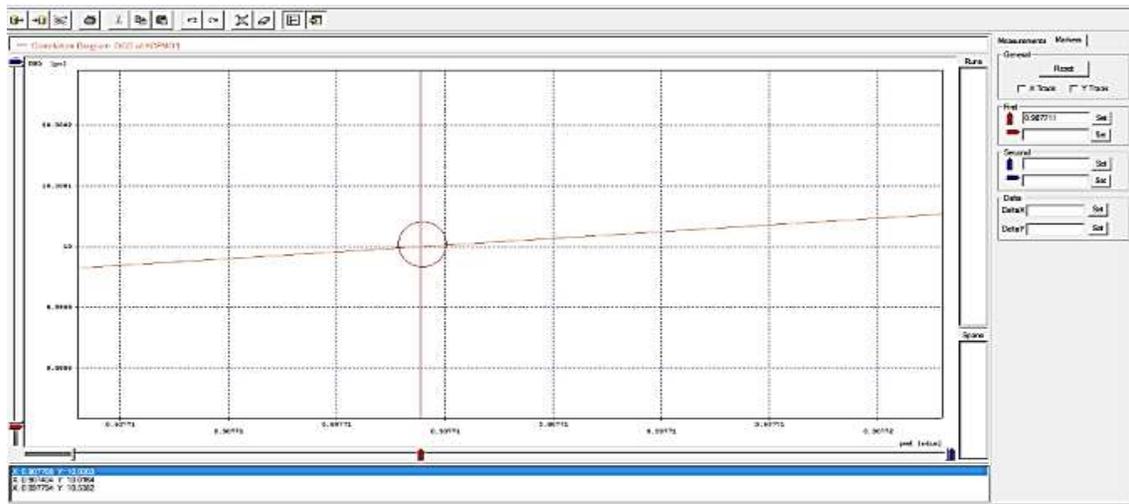


Figura 3. 58 Ampliación Figura 3. 57

La variación del factor Q, con respecto a las variaciones de coeficiente de PMD, mostrando que se obtuvieron valores óptimos, para todas estas variaciones, con una pequeña variación cerca del 1%, en algunas variaciones, con esto se puede concluir que PMD por sí sola no afecta el valor de Q, con respecto a la variación de coeficiente de PMD, para la modulación RZ-DQPSK a 4 canales.

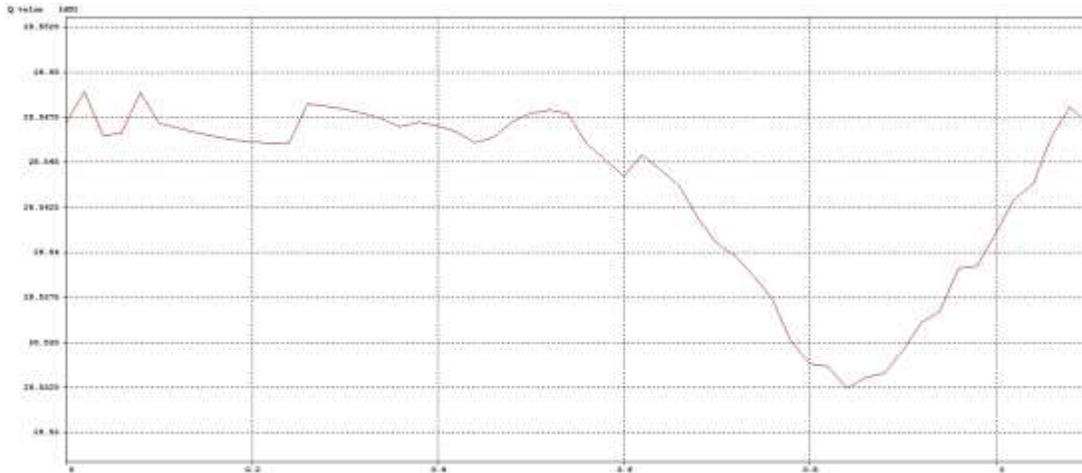


Figura 3. 59 Factor Q vs variación coeficiente de PMD

La variación del factor BER, con respecto a las variaciones de coeficiente de PMD, mostrando que se obtuvo un valor de BER=1 e-40 dB, constante para todas las variaciones de coeficiente de PMD, con esto se puede concluir que PMD por sí sola no afecta el valor de BER, con respecto la variación de coeficiente de PMD, para la modulación RZ-DQPSK a 4 canales.



Figura 3. 60 Factor BER vs variación coeficiente de PMD

### 3.2.3.2 Variaciones de coeficientes de PMD, para 4 canales para espectro X:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en los casos anteriores, variación de número de canales y variación de longitud. Se tomaron los espectros encontrados, para cada una

de las variaciones de coeficientes de PMD, y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático Figura 3. 61.

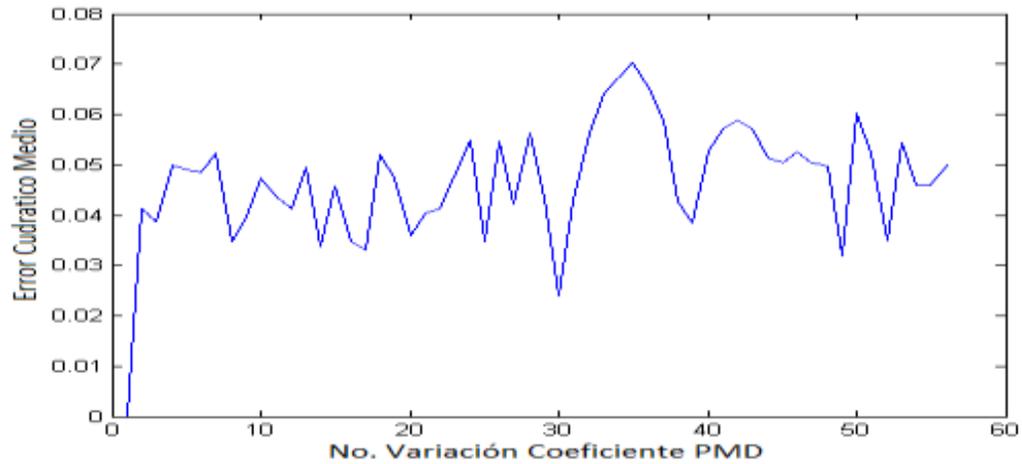


Figura 3. 61 Error medio cuadrático vs variación coeficiente de PMD, para 4 canal RZ-DQPSK. Espectro en X

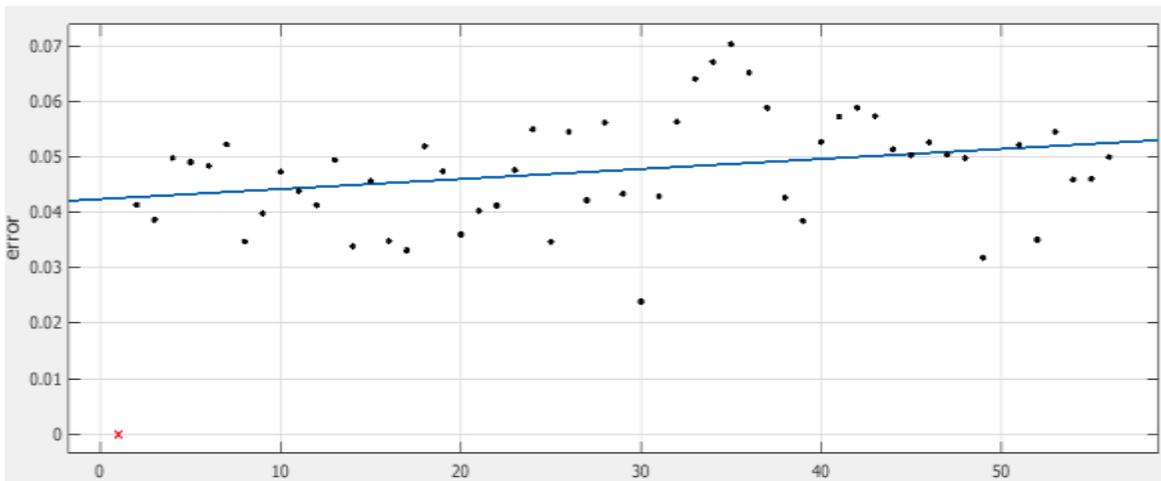


Figura 3. 62 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación coeficiente de PMD, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del error cuadrático con respecto al coeficiente de PMD, para este caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1=0.0001808$ .

### 3.2.3.3 Variaciones de coeficientes de PMD, para 4 canales para espectro Y:

Realizando un análisis, similar al elaborado para los espectros en X de la variación de longitudes para 1, 4 y 10 canales, se tomaron los espectros encontrados, para cada una de variaciones del

coeficiente de PMD y se compararon con el caso básico B2B, encontrando su error medio cuadrático Figura 3. 63.

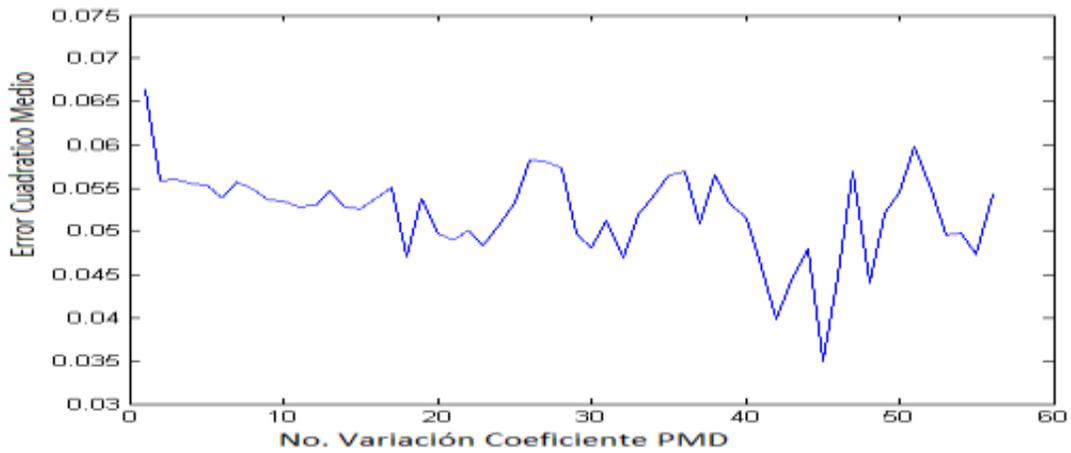


Figura 3. 63 Error medio cuadrático vs variación del coeficiente de PMD, para 4 canal RZ-DQPSK. Espectro en Y

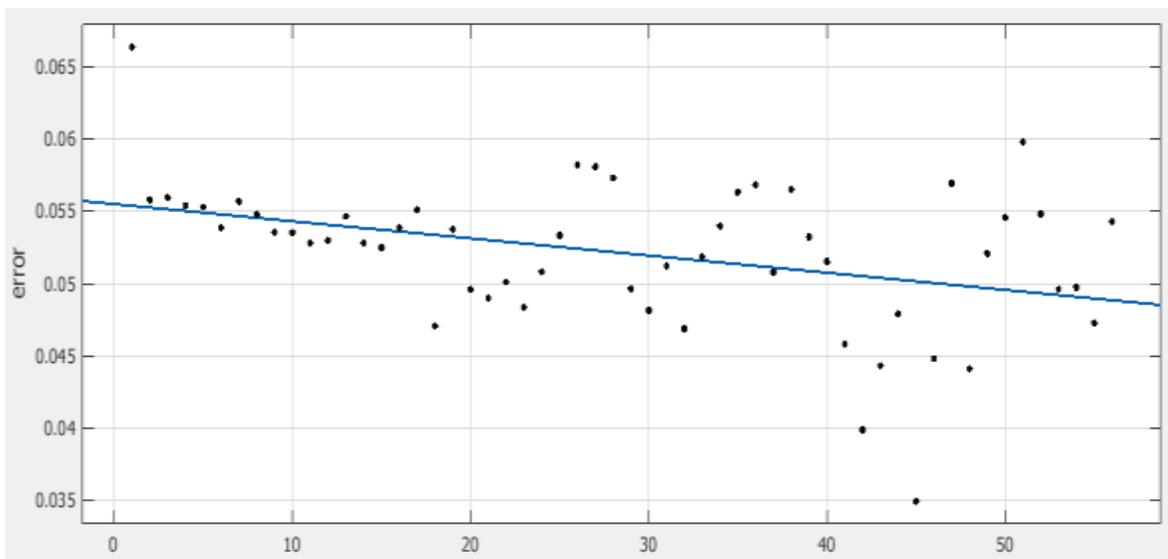


Figura 3. 64 Regresión lineal del error medio cuadrático vs variación de coeficiente de PMD, para 4 canales

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del error cuadrático con respecto al coeficiente de PMD, para este caso particular el valor de  $p_1$  es de:  $p_1 = -0.0001191$ .

Las variaciones obtenidas de la apertura del ojo, para los diferentes de valores de coeficiente de PMD, para 1, 4 y 10 canales, aunque en la gráfica se muestra que para 4 canales hay un cambio considerable, en el resultado del error con respecto al valor de la apertura de ojo del B2B, se puede ver que hay una similitud entre los valores para 1 y 10 canales, siendo este último importante por

la cantidad de información que lleva, además siendo 10 canales, el número de canales más apropiado para una red DWDM.

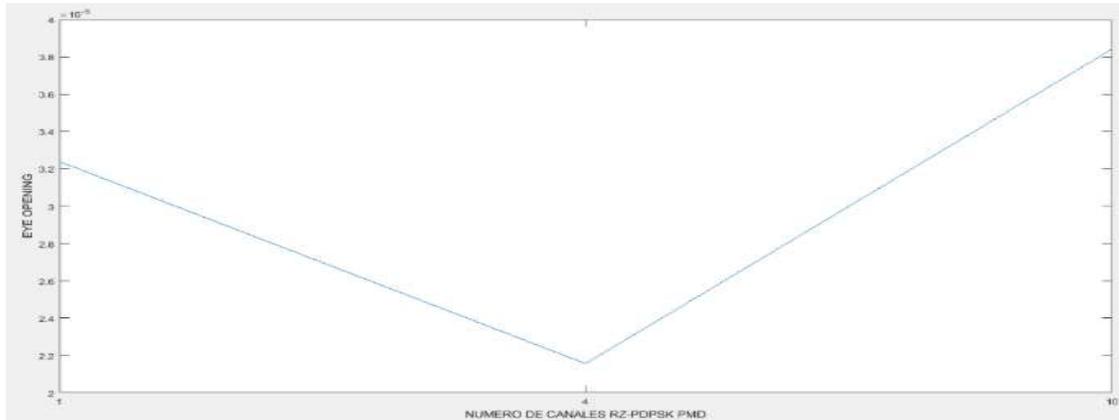


Figura 3. 65 Apertura de ojo para variaciones de coeficiente de PMD

Con los resultados obtenidos a partir de la comparación de la Figura 3. 65 con él B2B, se realizó la Tabla 3. 7:

A	1 canal	4 canales	10 canales
1.0 e-04	0.4068	0.2612	0.2007

Tabla 3. 7 Valores de error- coeficiente de PMD para RZ-DQPSK

### 3.2.4 CASO DE ESTUDIO 4: “ESCENARIO REAL DE SIMULACIÓN”

En la Figura 3. 66, se muestra el esquemático, usado para las simulaciones de caso real, para canales 10 canales, para una modulación RZ-DQPSK.

Para la realizar las simulaciones de escenario real se configuraron las frecuencias de transmisión de 193.1 THz a 194.0 THz, con un espaciamento de 100 GHz, también, se tuvieron en cuenta los efectos de la dispersión cromática, para esto se colocó un compensador en configuración balanceado, y tal como se encuentra en la referencia [32], se redujo el efecto de la dispersión cromática, suficientemente con el fin de asegurar, que los efectos observados son los de la PMD, la longitud del enlace se configuro a 100 Km, debido a que esta distancia es un valor típico de los enlaces, además se implementó una fibra mono modo Corning smf28e, amplificadores EDFA, debido a que este es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad, ya que es posible amplificar señales en la tercera ventana (1550nm), la configuración de bombeo que se estableció fue, Dual, Fibras DCF para compensar la CD para poder medir con seguridad el efecto de la PMD sobre el formato de modulación y el canal óptico.

Para determinar el valor de la distancia a utilizar en los tramos de fibra DCF, se realizó una simulación, en la que se encuentra el valor de distancia óptimo, con respecto a los parámetros de desempeño Q y BER.

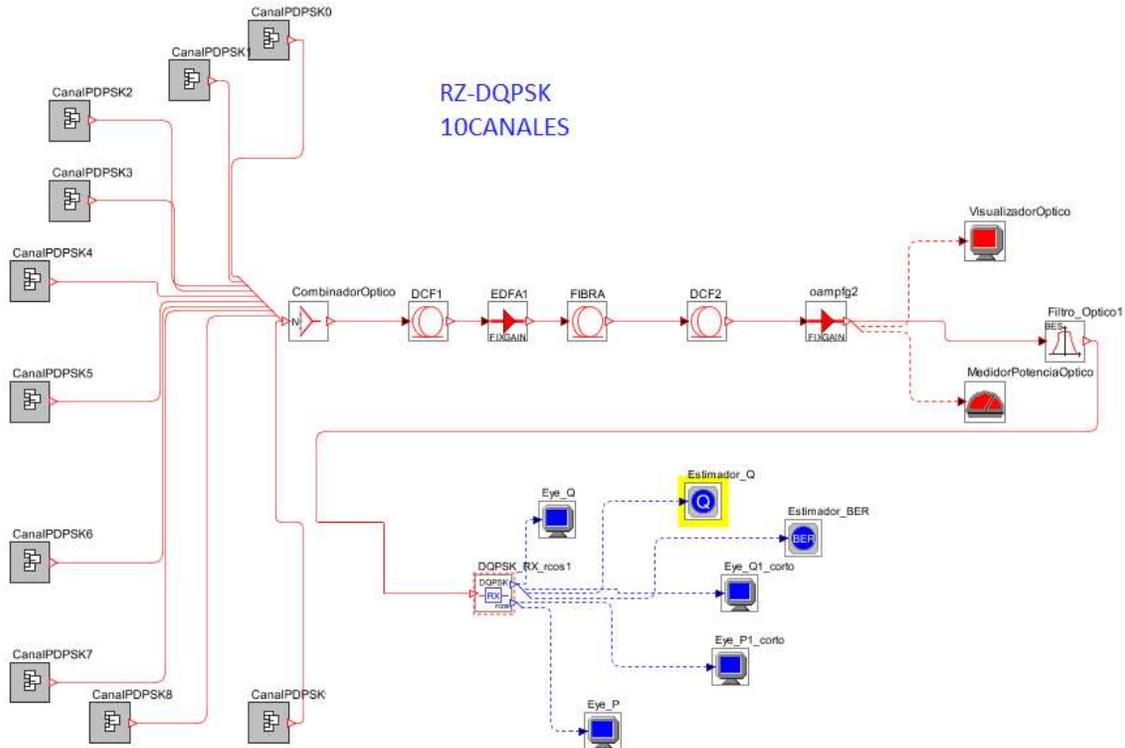


Figura 3. 66 Esquemático Escenario real RZ-DQPSK

Las variaciones de BER vs DCF y Q vs DCF, respectivamente, donde se consideraron las variaciones de coeficiente de PMD en la fibra smf28e de 0 a 1,1, similar a los realizados en casos anteriores, obteniendo los valores máximos de BER y de Q, respectivamente, cuando la DCF tiene un valor de 10 ps.Km/nm, debido a este resultado, para estas simulaciones se configura el valor de la DCF=10 ps.Km/nm.

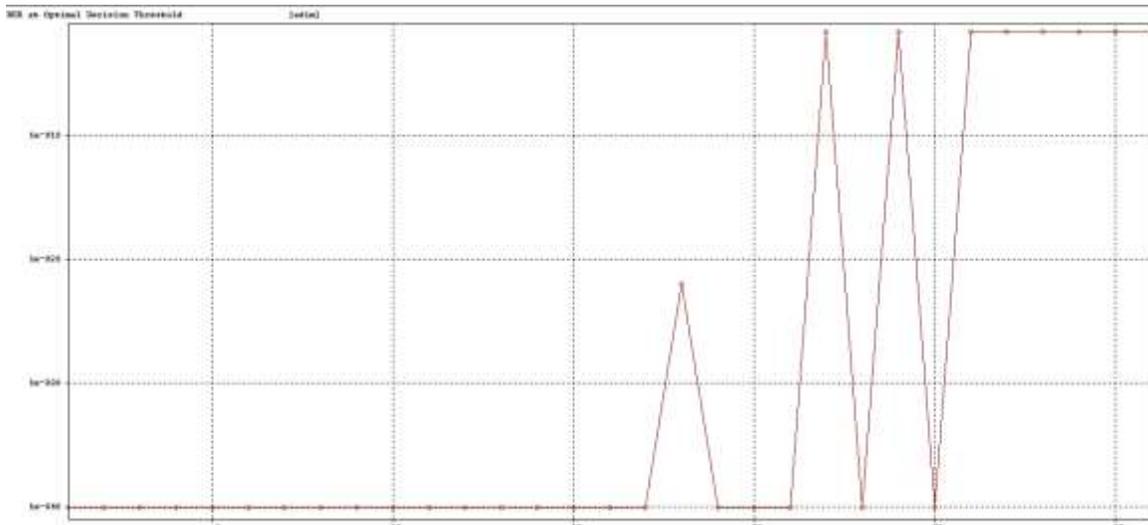


Figura 3. 67 Variación BER vs DCF

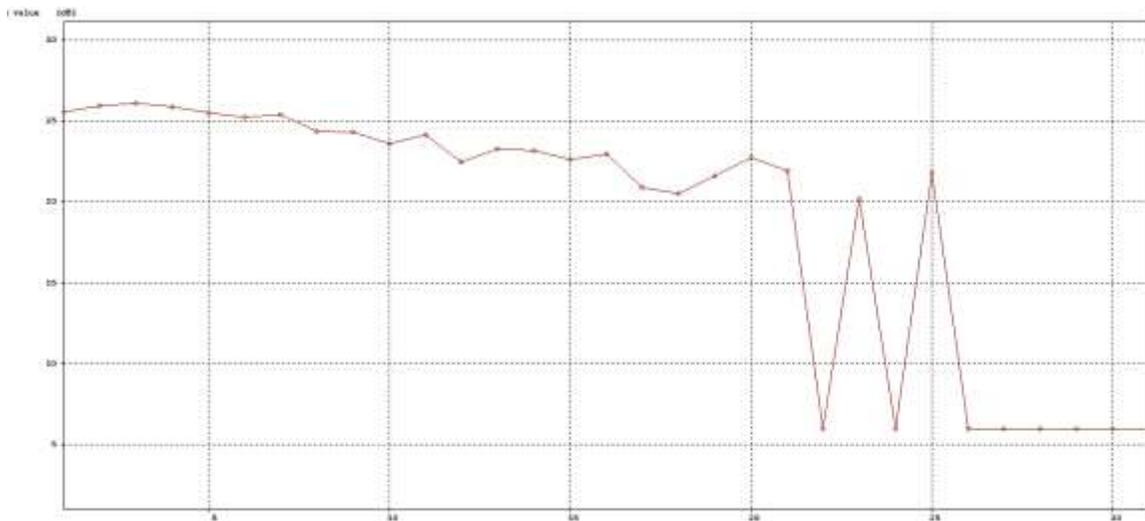


Figura 3. 68 Variación Q vs DCF

Se realiza un análisis, a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, anteriormente mostradas, utilizando los archivos (casos-DQPSK-AOPMD-(long, pmd) para 1, 4, 10 canales)<sup>10</sup> generados por el simulador. Ya que la PMD, afecta de manera distinta a las componente X e Y del espectro, se tienen en cuenta estos casos para el análisis del efecto de la PMD sobre las modulaciones y los canales ópticos.

Los resultados obtenidos de la DGD vs las variaciones del coeficiente de PMD, para RZ-DQPSK, en el las variaciones de coeficiente de PMD de 0 a 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  y en las variaciones de PMD de 0 a 1,1

<sup>10</sup> Anexos encontrados en la carpeta Anexos – Casos, en el cd del proyecto de grado

$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ , aumentando el valor de las variaciones de coeficiente de PMD, para encontrar el límite de DGD, propuesto en la teoría, que es de 10 ps.

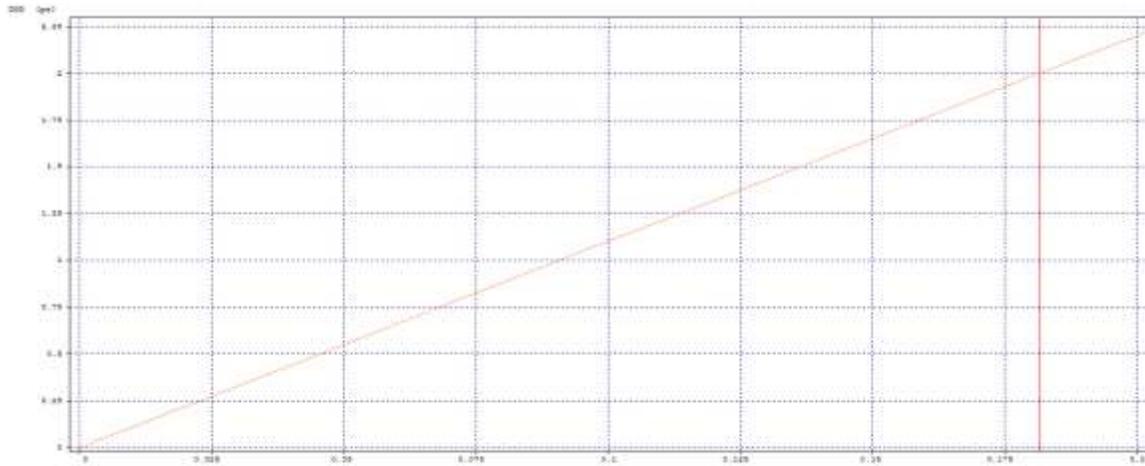


Figura 3. 69 DGD vs variaciones coeficiente PMD (0-0.2) para RZ-DQPSK

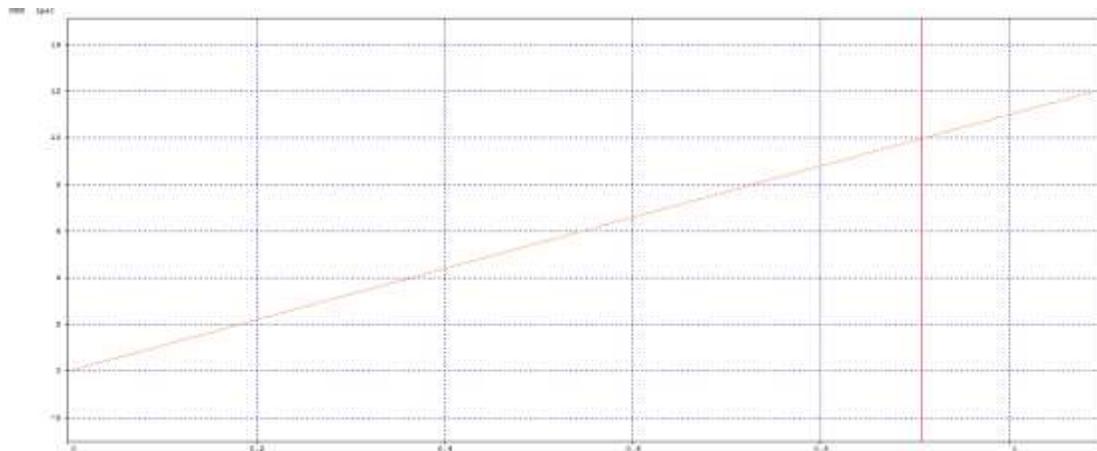


Figura 3. 70 DGD vs variaciones coeficiente PMD (0-1.1) para RZ-DQPSK

Para encontrar la medida del cambio del espectro óptico, para cada uno de los casos anteriores, se hace un análisis por medio del error cuadrático medio, utilizando la ecuación 3.1, mostrado en la Figura 3. 71 y Figura 3. 73, para el espectro X e Y, respectivamente.

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

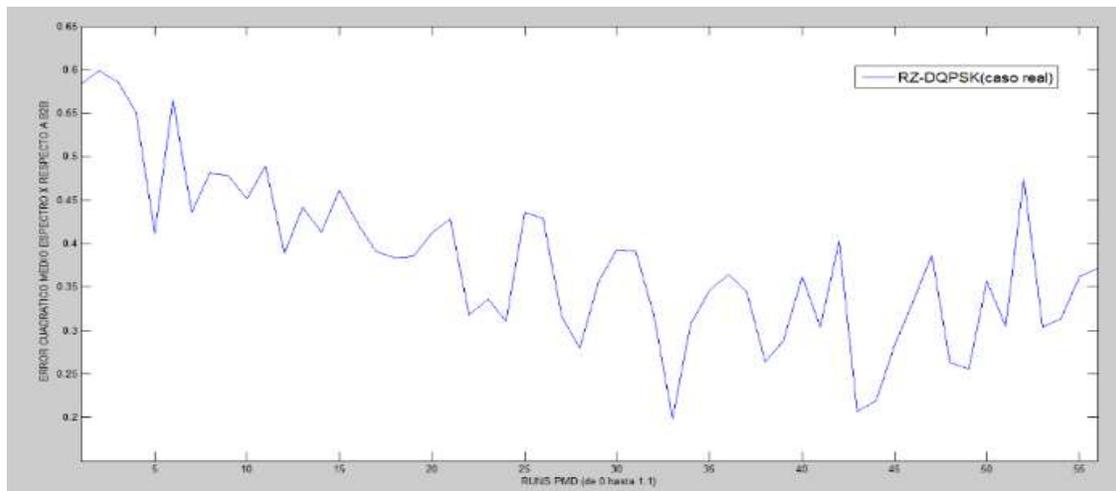


Figura 3. 71 Error en espectro X

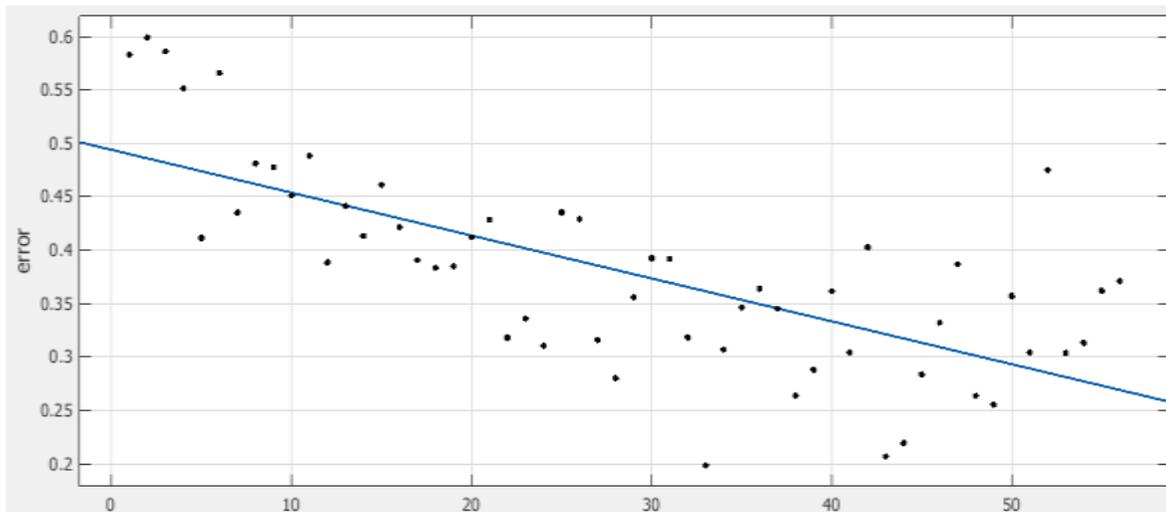


Figura 3. 72 Regresión lineal del error medio cuadrático en el espectro X

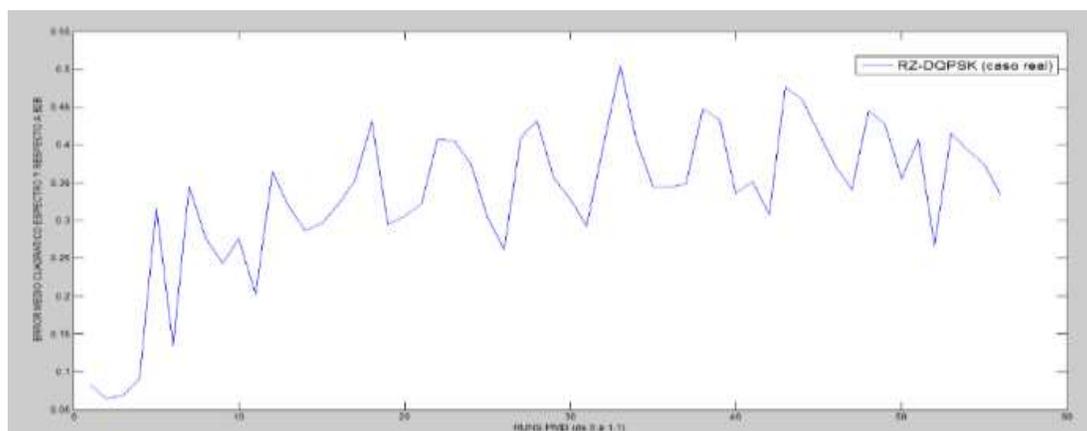


Figura 3. 73 Error en espectro Y

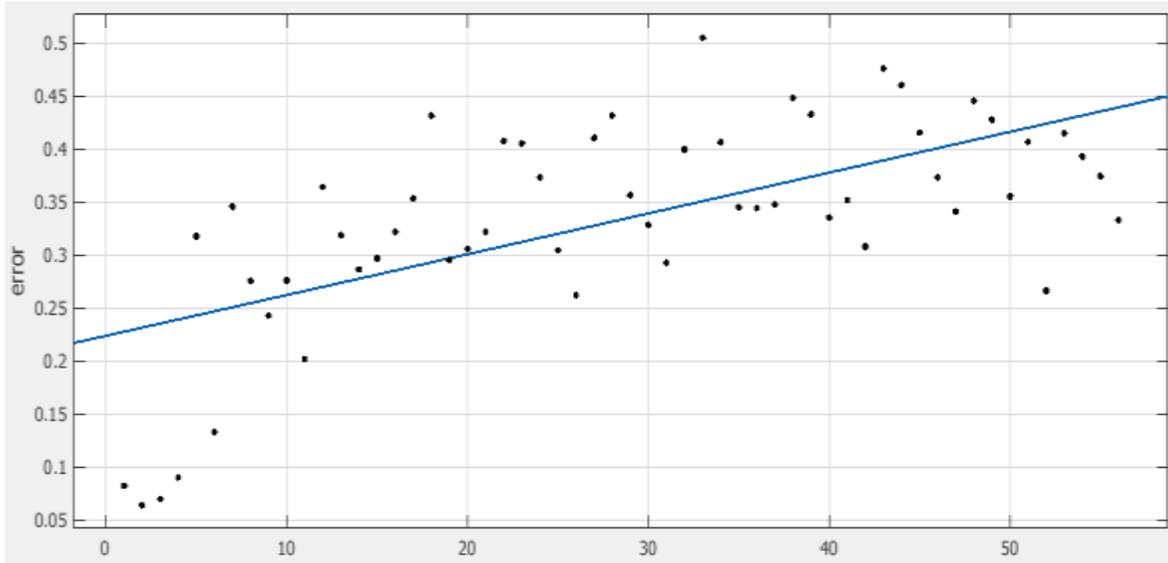


Figura 3. 74 Regresión lineal del error medio cuadrático en el espectro Y

Las variaciones de coeficiente de PMD vs Q y BER, respectivamente, donde se muestra que ambas graficas mantienen un valor por encima de los valores óptimos especificados para este estudio.

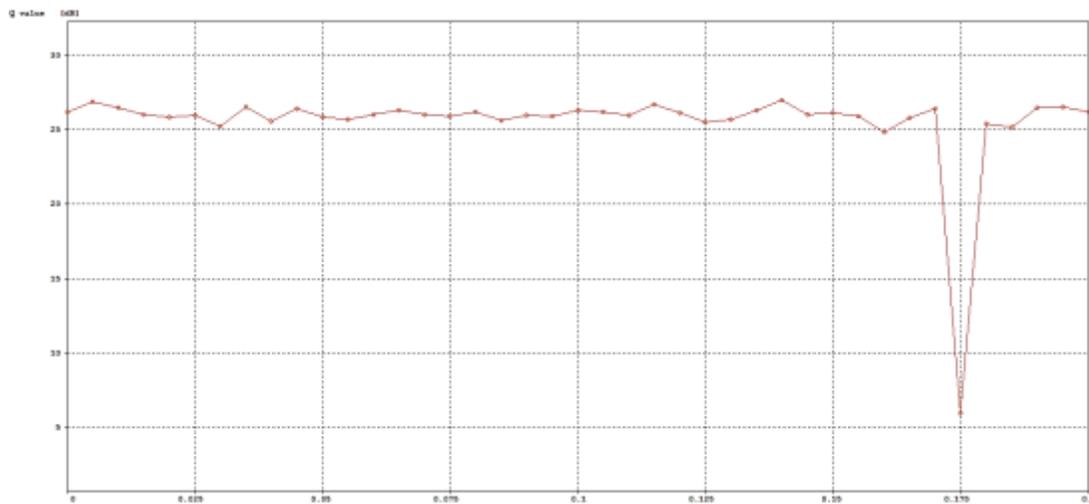


Figura 3. 75 Variación Q vs coeficiente de PMD

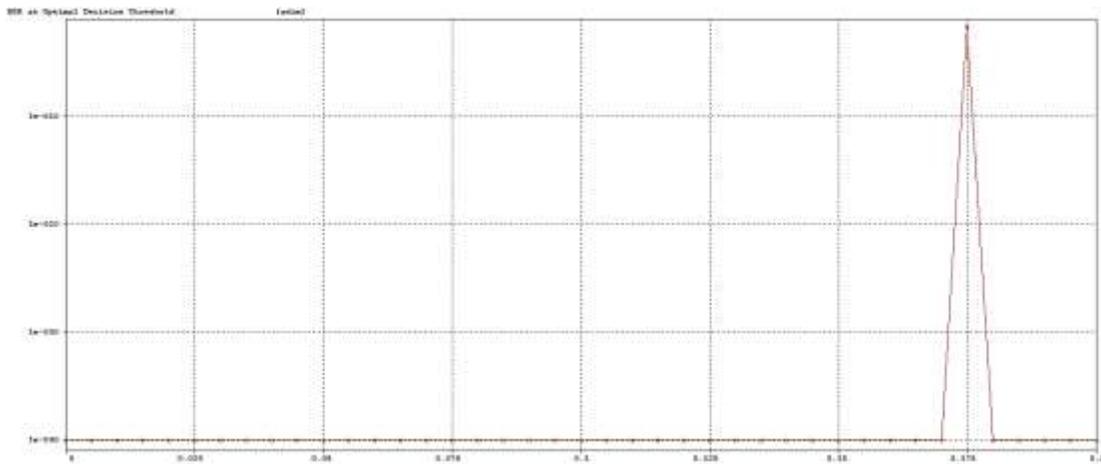


Figura 3. 76 Variación BER vs coeficiente de PMD

Las variaciones obtenidas de potencia de recepción vs coeficiente de PMD, encontrando que la PMD no tiene efecto significativo en la potencia de recepción.

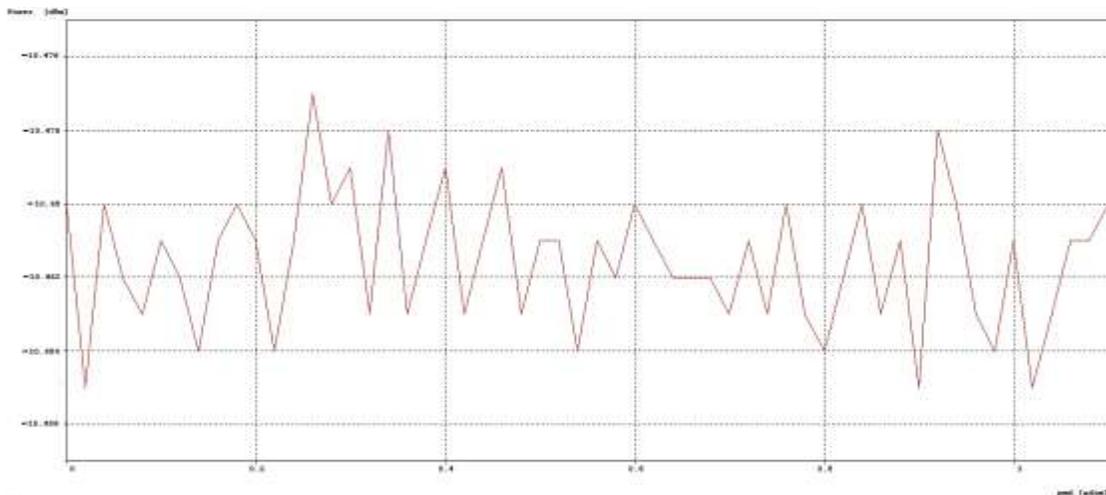


Figura 3. 77 variaciones de potencia de recepción vs coeficiente de PMD

Se encontró que la señal eléctrica, visualizándola en una ventana de tiempo predeterminada de 1ns, que la forma de la señal no sufría variaciones importantes, pero se presentaban delays, entre valores sucesivos de PMD. Usando los archivos<sup>11</sup> que se generan de cada variación de coeficiente de PMD, en el simulador y basándonos en el valor de un máximo del caso B2B (correspondiente a cada escenario) de la señal en la ventana temporal de visualización, se pudo determinar el tiempo en que este se produce.

<sup>11</sup> Archivos encontrados en la carpeta Anexos –Delays, del cd del proyecto

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

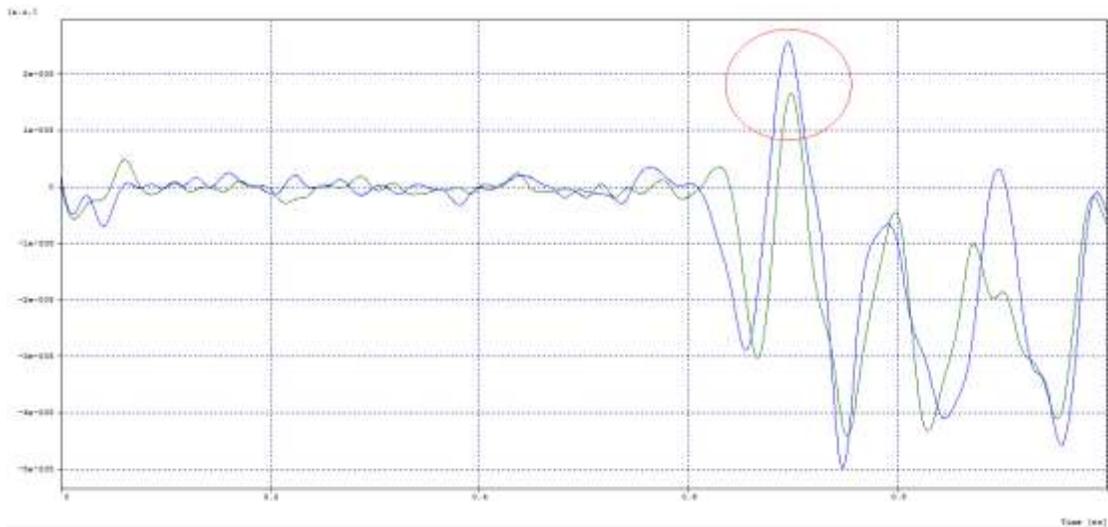


Figura 3. 78 Señal eléctrica a la salida del receptor RZ-DQPSK

En la Figura 3. 78, la curva verde corresponde al caso B2B, la curva azul corresponde a una variación de coeficiente de PMD, y utilizando los valores encontrados de la parte de la gráfica encerrados en el círculo, donde se encuentran los valores picos de cada una de la curvas, los cuales son usados para determinar el desfase temporal o delay, tomando el caso B2B correspondiente como referencia.

A partir de los resultados anteriores, se encontraron cada uno de los delays, obteniendo las Figura 3. 79.

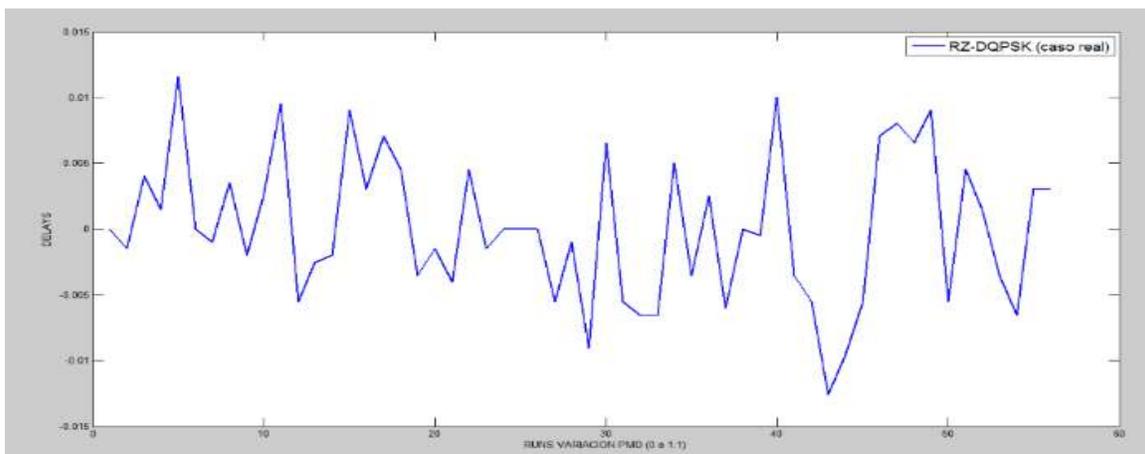


Figura 3. 79 Delays para cada variación de coeficiente de PMD para RZ-DQPSK

Mediante el uso de la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab, se realizó una regresión lineal de la Figura 3. 79, obteniendo la Figura 3. 80. En donde el parámetro de la pendiente es de importancia debido a que nos da el peso de la variación específica.

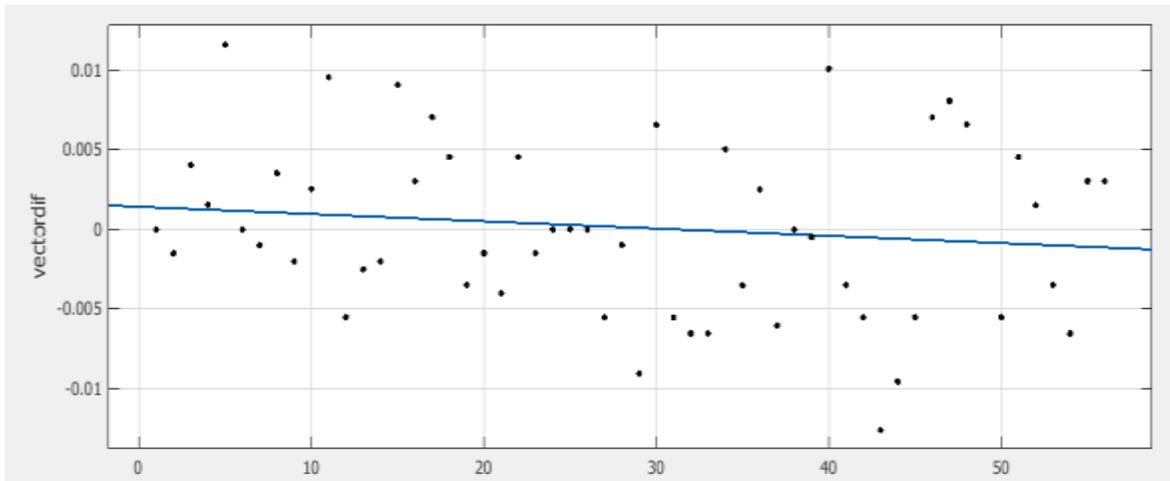
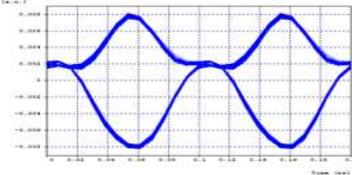
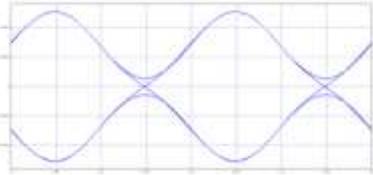
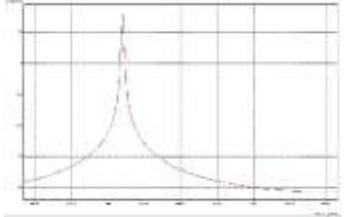
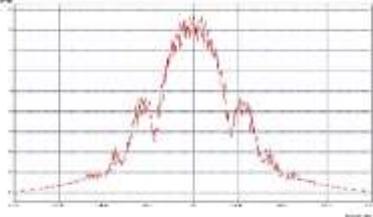
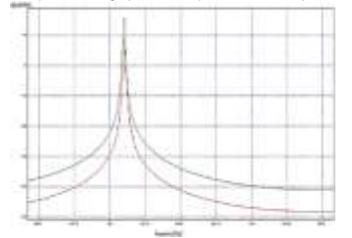
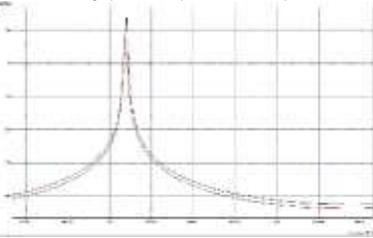


Figura 3. 80 Regresión lineal delays vs variaciones coeficiente PMD RZ-DQPSK

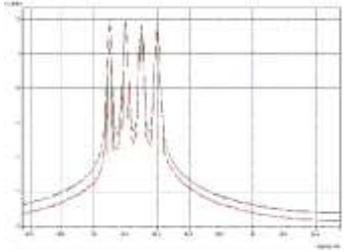
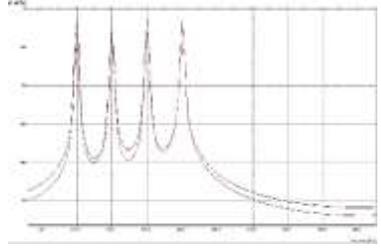
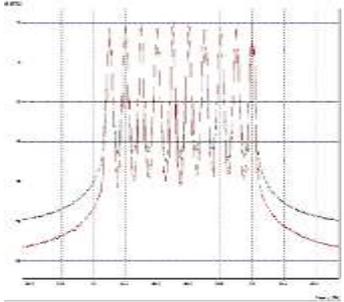
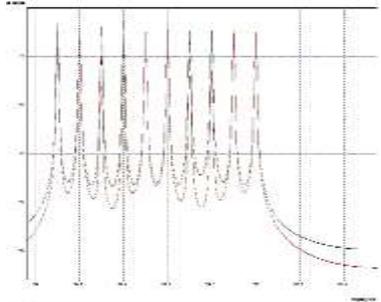
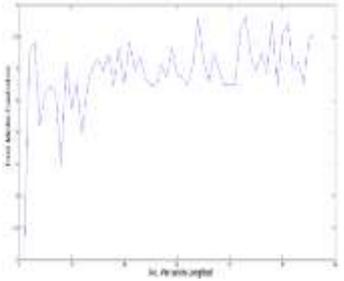
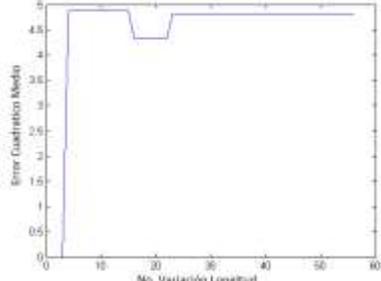
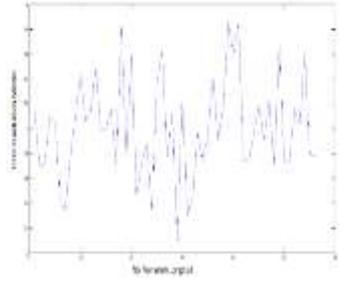
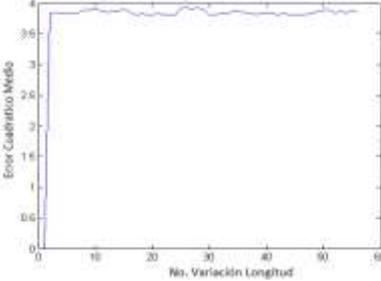
## CAPITULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN ESTUDIADOS Y SU TOLERANCIA FRENTE A LA PMD

En el capítulo 3, se realizaron una serie de simulaciones, acorde a lo definido en el capítulo 2; definiendo dos escenarios de simulación, de los formatos estudiados RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, y cada escenario consta de 4 casos de estudio, cada uno de estos con sus configuraciones pertinentes.

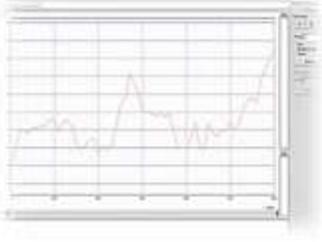
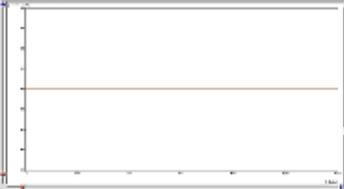
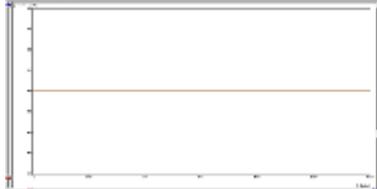
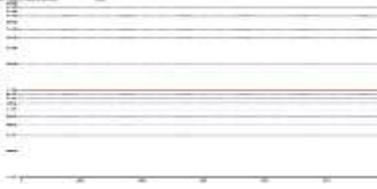
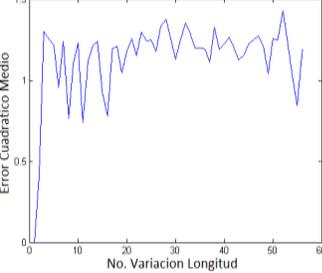
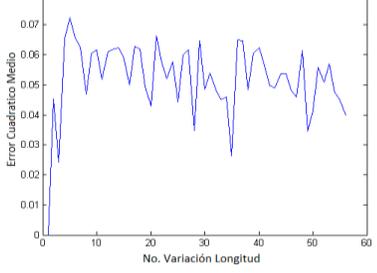
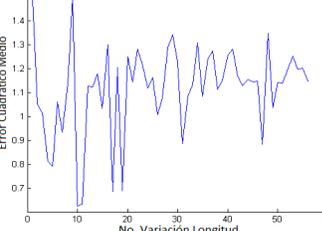
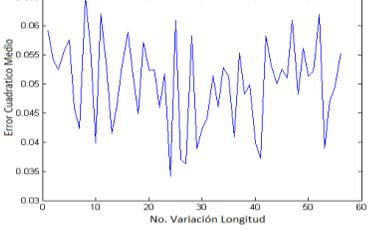
En el presente capítulo se muestra el análisis comparativo de los formatos de modulación estudiados, a partir de los resultados y evaluación de las simulaciones, obtenidos en el capítulo 3, con lo cual, se pudo determinar algunos factores que inciden en el desempeño de los formatos de modulación y su tolerancia frente a la PMD, como se observa en la Tabla 4. 1, en la que se resume el comportamiento de los formatos de modulación sobre la red óptica, a una velocidad de transmisión de 10Gbps, a medida que se variaron los parámetros simulación; lo anterior, se realiza con el fin de establecer cual presenta una mayor tolerancia y desempeño en una red DWDM a 10Gbps.

Técnica de Formación de pulsos	RZ						
Modulación	PDPSK	DQPSK	TOLERANCIA				
Diagrama de Ojo Back-To-Back			NO APLICA				
Espectro de Frecuencia Back-To-Back			NO APLICA				
Caso 1: Var No. de Canales (1 canal)  Espectro Óptico PMD de 0,2 ps/√km y una Longitud de 100 km	Efecto de la PMD a un canal vs B2B (curva roja) vs B2B(curva verde) 	Efecto de la PMD a un canal vs B2B(curva roja) vs B2B(curva verde) 	$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x[i]-x[i])^2}{N}}$ <table border="1"> <tr> <td>PDPSK</td> <td>DQPSK</td> </tr> <tr> <td>4.2091</td> <td>3.8280</td> </tr> </table>	PDPSK	DQPSK	4.2091	3.8280
PDPSK	DQPSK						
4.2091	3.8280						

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>Caso 1:</p> <p>Var. No. Canales(4 canales)</p> <p>Espectro Óptico</p> <p>PMD de 0,2 ps/√km y una Longitud de 100 km</p>	<p>Efecto de la PMD a cuatro canales (curva roja) vs B2B(curva verde)</p> 	<p>Efecto de la PMD a cuatro canales (curva roja) vs B2B(curva verde)</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PDPSK</th> <th>DQPSK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.6709</td> <td>0.0714</td> </tr> </tbody> </table>	PDPSK	DQPSK	1.6709	0.0714
PDPSK	DQPSK						
1.6709	0.0714						
<p>Caso 1:</p> <p>Var. No. Canales(10canales)</p> <p>Espectro Óptico</p> <p>PMD de 0,2 ps/√km y una Longitud de 100 km</p>	<p>Efecto de la PMD a diez canales (curva roja) vs B2B(curva verde)</p> 	<p>Efecto de la PMD a diez canales (curva roja) vs B2B(curva verde)</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PDPSK</th> <th>DQPSK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.0966</td> <td>0.0796</td> </tr> </tbody> </table>	PDPSK	DQPSK	2.0966	0.0796
PDPSK	DQPSK						
2.0966	0.0796						
<p>Caso 2:</p> <p>Var. De Longitudes para 1 canal</p>	<p>Error en espectro en X</p> 	<p>Error en espectro en X</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PDPSK</th> <th>DQPSK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.01717</td> <td>0.01959</td> </tr> </tbody> </table>	PDPSK	DQPSK	0.01717	0.01959
PDPSK	DQPSK						
0.01717	0.01959						
<p>Con AOPMD, Coeficiente de PMD de 0,2 ps/√km y Variaciones de Longitud de 0KM a 6000KM</p>	<p>Error en espectro en Y</p> 	<p>Error en espectro en Y</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PDPSK</th> <th>DQPSK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.00298</td> <td>0.00708</td> </tr> </tbody> </table>	PDPSK	DQPSK	0.00298	0.00708
PDPSK	DQPSK						
0.00298	0.00708						

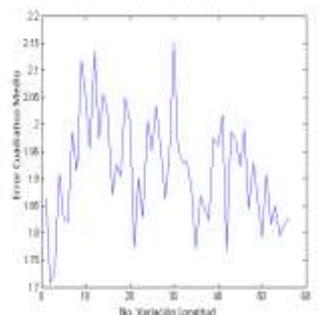
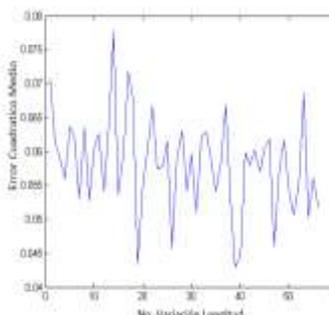
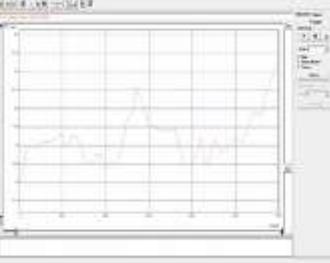
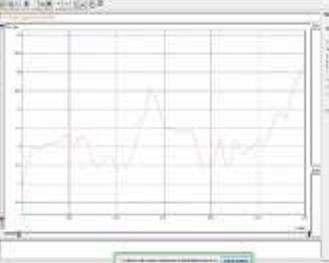
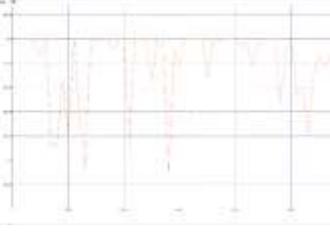
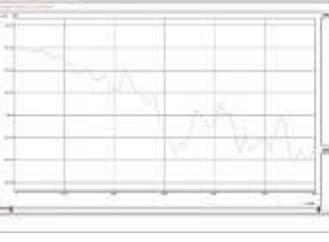
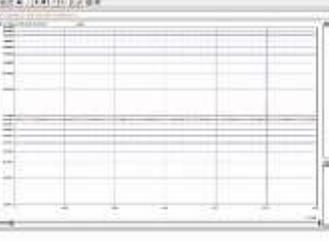
Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>Caso 2:</p> <p>Var. De Longitudes para 1 canal</p>	<p>DGD vs Variaciones Longitud</p> 	<p>DGD vs Variaciones Longitud</p> 					
<p>Con AOPMD, Coeficiente de PMD de 0,2 ps/√km y Variaciones de Longitud de 0KM a 6000KM</p>	<p>Factor Q vs Variaciones de Longitud</p> 	<p>Factor Q vs Variaciones de Longitud</p> 					
	<p>Factor BER vs Variaciones de Longitud</p> 	<p>Factor BER vs Variaciones de Longitud</p> 					
<p>Caso 2:</p> <p>Var. De Longitudes para 4 canales</p>	<p>Error en espectro en X</p> 	<p>Error en espectro en X</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PDPSK</th> <th>DQPSK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.003261</td> <td>0.000173</td> </tr> </tbody> </table>	PDPSK	DQPSK	0.003261	0.000173
PDPSK	DQPSK						
0.003261	0.000173						
<p>Con AOPMD, Coeficiente de PMD de 0,2 ps/√km y Variaciones de Longitud de 0KM a 6000KM</p>	<p>Error en espectro en Y</p> 	<p>Error en espectro en Y</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PDPSK</th> <th>DQPSK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.003159</td> <td>0.00303</td> </tr> </tbody> </table>	PDPSK	DQPSK	0.003159	0.00303
PDPSK	DQPSK						
0.003159	0.00303						

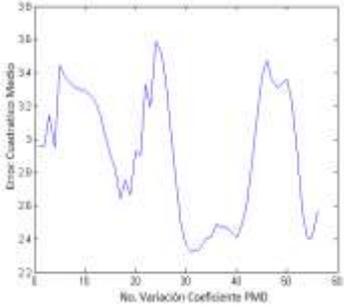
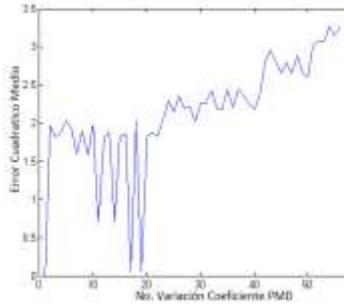
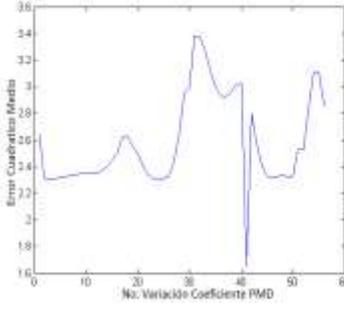
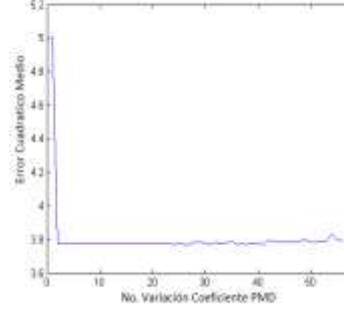
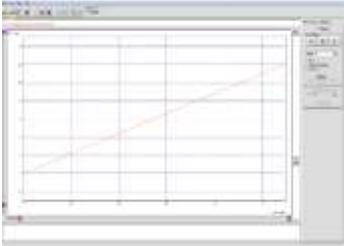
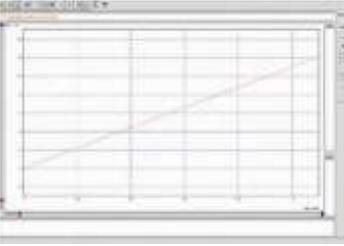
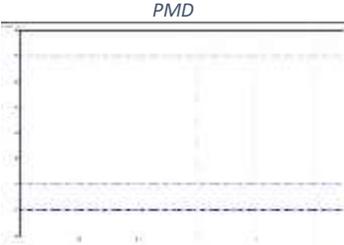
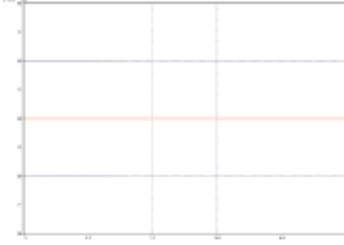
Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>Caso 2:</p> <p>Var. De Longitudes para 4 canales</p> <p>Con AOPMD, Coeficiente de PMD de 0,2 ps/<math>\sqrt{km}</math> y Variaciones de Longitud de 0KM a 6000KM</p>	<p>DGD vs variaciones Longitud</p>	<p>DGD vs Variaciones Longitud</p>					
	<p>Factor Q vs variaciones de longitud</p>	<p>Factor Q vs variaciones de longitud</p>					
	<p>Factor BER vs variaciones de longitud</p>	<p>Factor BER vs variaciones de longitud</p>					
<p>Caso 2:</p> <p>Var. De Longitudes</p>	<p>Error en espectro en X</p>	<p>Error en espectro en X</p>	<table border="1"> <tr> <td>PDPSK</td> <td>DQPSK</td> </tr> <tr> <td>0.02813</td> <td>0.005449</td> </tr> </table>	PDPSK	DQPSK	0.02813	0.005449
PDPSK	DQPSK						
0.02813	0.005449						

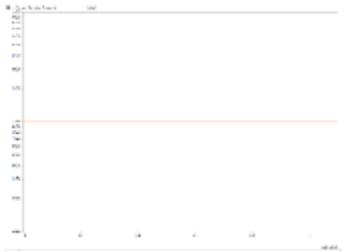
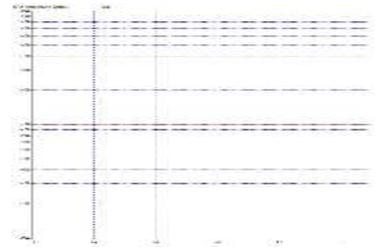
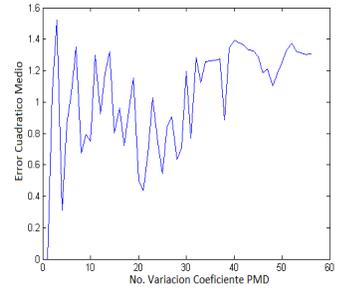
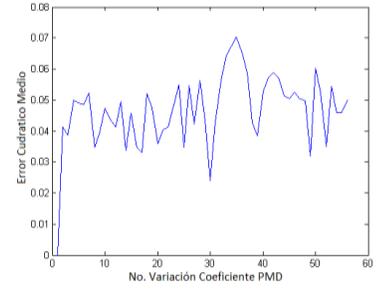
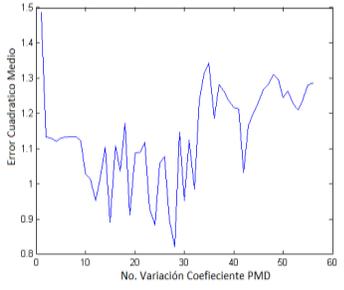
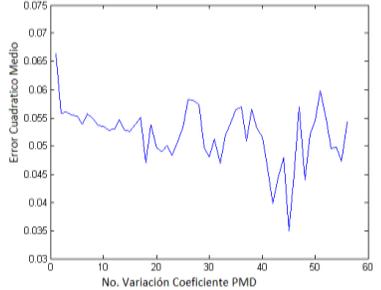
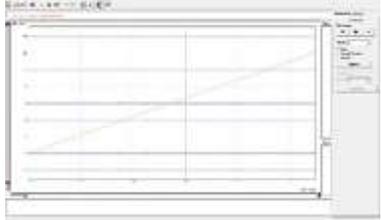
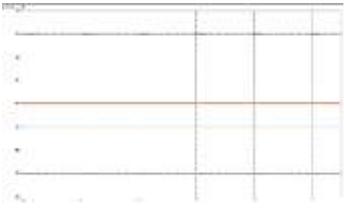
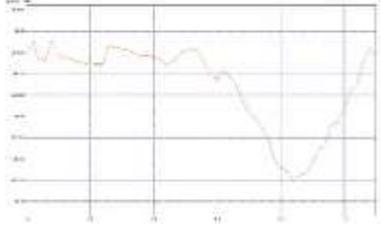
Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>para 10 canales</p> <p>Con AOPMD, Coeficiente de PMD de 0,2 ps/<math>\sqrt{km}</math> y Variaciones de Longitud de 0KM a 6000KM</p>	<p>Error en espectro en Y</p> 	<p>Error en espectro en Y</p> 	<table border="1"> <tr> <td><b>PDPSK</b></td> <td><b>DQPSK</b></td> </tr> <tr> <td>0.00116</td> <td>0.0001269</td> </tr> </table>	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>	0.00116	0.0001269
<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>						
0.00116	0.0001269						
<p>Caso 2:</p>	<p>DGD vs variaciones longitud</p> 	<p>DGD vs variaciones longitud</p> 					
<p>Var. De Longitudes para 10 canales</p>	<p>Factor Q vs variaciones de longitud</p> 	<p>Factor Q vs variaciones de longitud</p> 					
<p>Con AOPMD, Coeficiente de PMD de 0,2 ps/<math>\sqrt{km}</math> y Variaciones de Longitud de 0KM a 6000KM</p>	<p>Factor BER vs variaciones de longitud</p> 	<p>Factor BER vs variaciones de longitud</p> 					

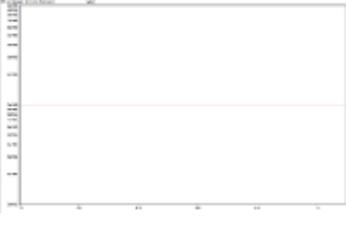
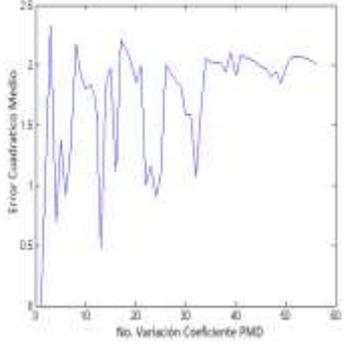
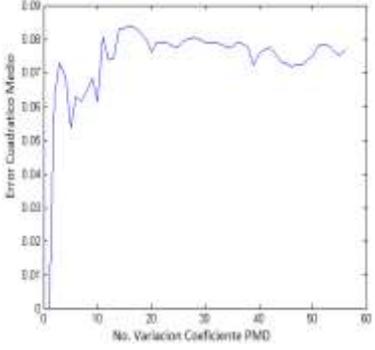
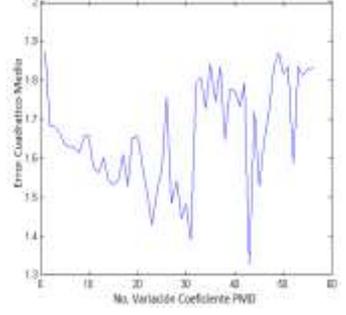
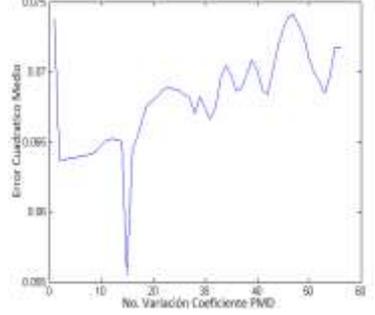
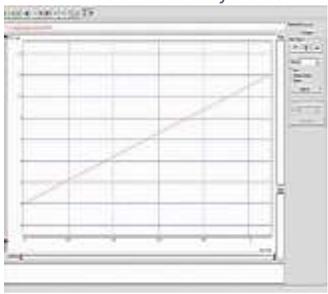
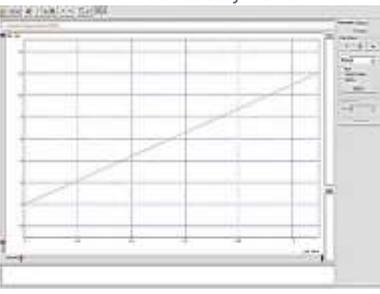
Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>Caso 3:</p> <p>Var. de coeficiente de PMD para 1 canal</p> <p>Con</p>	<p>Error en espectro en X</p> 	<p>Error en espectro en X</p> 	<table border="1"> <tr> <td>PDPSK</td> <td>DQPSK</td> </tr> <tr> <td>0.007648</td> <td>0.03109</td> </tr> </table>	PDPSK	DQPSK	0.007648	0.03109
PDPSK	DQPSK						
0.007648	0.03109						
<p>AOPMD, Longitud de 100km y variaciones de coeficiente de PMD de 0 a 1.1 ps/√km</p>	<p>Error en espectro en Y</p> 	<p>Error en espectro en Y</p> 	<table border="1"> <tr> <td>PDPSK</td> <td>DQPSK</td> </tr> <tr> <td>0.007242</td> <td>0.001875</td> </tr> </table>	PDPSK	DQPSK	0.007242	0.001875
PDPSK	DQPSK						
0.007242	0.001875						
<p>Caso 3:</p> <p>Var. de coeficiente de PMD para 1 canal</p>	<p>DGD vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>DGD vs variaciones de coeficiente PMD</p> 					
<p>Con</p> <p>AOPMD, Longitud de 100km y variaciones de coeficiente</p>	<p>Factor Q vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>Factor Q vs variaciones de coeficiente PMD</p> 					

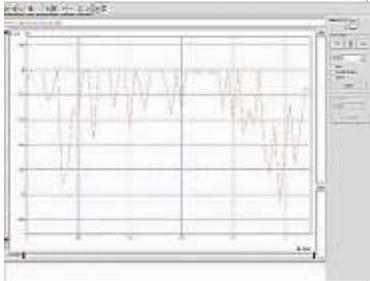
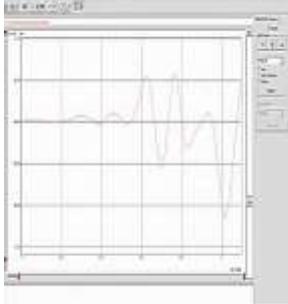
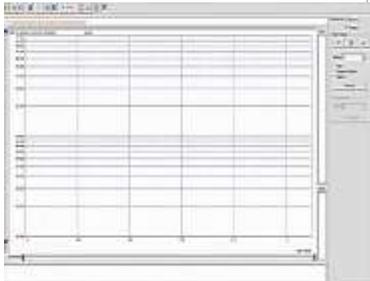
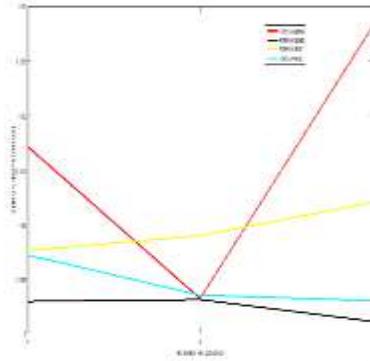
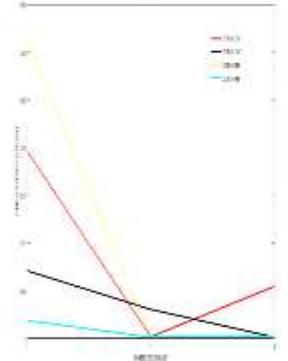
Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>de PMD de 0 a 1.1 ps/<math>\sqrt{\text{km}}</math></p>	<p>Factor BER vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>Factor BER vs variaciones de coeficiente PMD</p> 					
<p>Caso 3:  Var. de coeficiente de PMD para 4 canales</p> <p>Con</p>	<p>Error en espectro en X</p> 	<p>Error en espectro en X</p>  <table border="1" data-bbox="1166 659 1385 716"> <tr> <td><b>PDPSK</b></td> <td><b>DQPSK</b></td> </tr> <tr> <td>0.009001</td> <td>0.0001808</td> </tr> </table>	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>	0.009001	0.0001808	
<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>						
0.009001	0.0001808						
<p>AOPMD, Longitud de 100km y variaciones de coeficiente de PMD de 0 a 1.1 ps/<math>\sqrt{\text{km}}</math></p>	<p>Error en espectro en Y</p> 	<p>Error en espectro en Y</p>  <table border="1" data-bbox="1166 1001 1385 1058"> <tr> <td><b>PDPSK</b></td> <td><b>DQPSK</b></td> </tr> <tr> <td>0.003579</td> <td>0.0001191</td> </tr> </table>	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>	0.003579	0.0001191	
<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>						
0.003579	0.0001191						
<p>Caso 3:  Var. de coeficiente de PMD para 4 canales</p> <p>Con</p>	<p>DGD vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>DGD vs variaciones de coeficiente PMD</p> 					
<p>AOPMD, Longitud de 100km y variaciones de coeficiente</p>	<p>Factor Q vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>Factor Q vs variaciones de coeficiente PMD</p> 					

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>de PMD de 0 a 1.1 ps/<math>\sqrt{\text{km}}</math></p>	<p>Factor BER vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>Factor BER vs variaciones de coeficiente PMD</p> 					
<p>Caso 3:  Var. de coeficiente de PMD para 10 canales  Con</p>	<p>Error en espectro en X</p> 	<p>Error en espectro en X</p> 	<table border="1"> <tr> <td><b>PDPSK</b></td> <td><b>DQPSK</b></td> </tr> <tr> <td>0.01206</td> <td>0.000121</td> </tr> </table>	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>	0.01206	0.000121
<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>						
0.01206	0.000121						
<p>AOPMD, Longitud de 100km y variaciones de coeficiente de PMD de 0 a 1.1 ps/<math>\sqrt{\text{km}}</math></p>	<p>Error en espectro en Y</p> 	<p>Error en espectro en Y</p> 	<table border="1"> <tr> <td><b>PDPSK</b></td> <td><b>DQPSK</b></td> </tr> <tr> <td>0.003579</td> <td>0.0001191</td> </tr> </table>	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>	0.003579	0.0001191
<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>						
0.003579	0.0001191						
<p>Caso 3:  Var. de coeficiente de PMD para 10 canales</p>	<p>DGD vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>DGD vs variaciones coeficiente PMD</p> 					

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

<p>Con</p> <p>AOPMD, Longitud de 100km y variaciones de coeficiente de PMD de 0 a 1.1 ps/√km</p>	<p>Factor Q vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>Factor Q vs variaciones de coeficiente PMD</p> 																			
	<p>Factor BER vs variaciones de coeficiente PMD</p> 	<p>Factor BER vs variaciones de coeficiente PMD</p> 																			
<p>Errores en espectros de variaciones de longitud y coeficiente de PMD para 1, 4 y 10 canales con AOPDM</p>																					
<p>Error compilado Espectro X</p>	<table border="1"> <tr> <td>Variación de longitud</td> <td>Variación de PMD</td> </tr> <tr> <td>0.01618</td> <td>0.00765</td> </tr> </table>	Variación de longitud	Variación de PMD	0.01618	0.00765	<table border="1"> <tr> <td>Variación de longitud</td> <td>Variación de PMD</td> </tr> <tr> <td>0.0084</td> <td>0.010463</td> </tr> </table>	Variación de longitud	Variación de PMD	0.0084	0.010463	<table border="1"> <tr> <td>Long</td> <td>DQPSK</td> </tr> <tr> <td>PMD</td> <td>PDPSK</td> </tr> </table>	Long	DQPSK	PMD	PDPSK						
Variación de longitud	Variación de PMD																				
0.01618	0.00765																				
Variación de longitud	Variación de PMD																				
0.0084	0.010463																				
Long	DQPSK																				
PMD	PDPSK																				
<p>Error compilado Espectro Y</p>	<table border="1"> <tr> <td>Variación de longitud</td> <td>Variación de PMD</td> </tr> <tr> <td>0.002436</td> <td>0.004624</td> </tr> </table>	Variación de longitud	Variación de PMD	0.002436	0.004624	<table border="1"> <tr> <td>Variación de longitud</td> <td>Variación de PMD</td> </tr> <tr> <td>0.0034126</td> <td>0.0007141</td> </tr> </table>	Variación de longitud	Variación de PMD	0.0034126	0.0007141	<table border="1"> <tr> <td>Long</td> <td>PDPSK</td> </tr> <tr> <td>PMD</td> <td>DQPSK</td> </tr> </table>	Long	PDPSK	PMD	DQPSK						
Variación de longitud	Variación de PMD																				
0.002436	0.004624																				
Variación de longitud	Variación de PMD																				
0.0034126	0.0007141																				
Long	PDPSK																				
PMD	DQPSK																				
<p>Error compilado por número de Canales</p>	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>0.00876</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.00475</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0.0111025</td> </tr> </table>	1	0.00876	4	0.00475	10	0.0111025	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>0.0149</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.07439</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0.00146</td> </tr> </table>	1	0.0149	4	0.07439	10	0.00146	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>PDPSK</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>PDPSK</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>DQPSK</td> </tr> </table>	1	PDPSK	4	PDPSK	10	DQPSK
1	0.00876																				
4	0.00475																				
10	0.0111025																				
1	0.0149																				
4	0.07439																				
10	0.00146																				
1	PDPSK																				
4	PDPSK																				
10	DQPSK																				

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

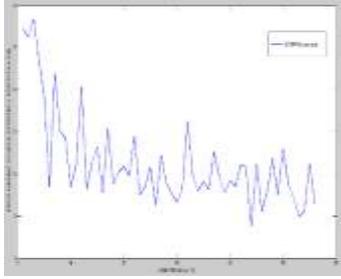
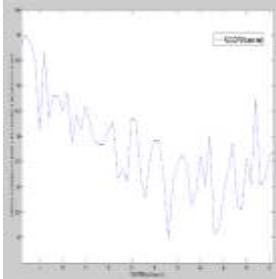
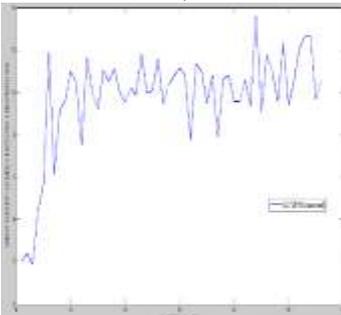
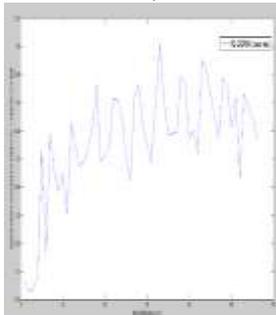
Caso 4:  "Escenario Real"			<table border="1"> <tr> <td><b>PDPSK</b></td> <td><b>DQPSK</b></td> </tr> <tr> <td>0.004013</td> <td>0.08558</td> </tr> </table>	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>	0.004013	0.08558
	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>					
0.004013	0.08558						
		<table border="1"> <tr> <td><b>PDPSK</b></td> <td><b>DQPSK</b></td> </tr> <tr> <td>0.08245</td> <td>0.003847</td> </tr> </table>	<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>	0.08245	0.003847	
<b>PDPSK</b>	<b>DQPSK</b>						
0.08245	0.003847						

Tabla 4. 1 Análisis comparativo entre formatos de modulación RZ-PDPSK y R-DQPSK

En el capítulo 3, se analizaron los resultados obtenidos de la serie de simulaciones, propuestas en el capítulo 2, para cada modulación estudiada, a continuación se exponen los análisis de los resultados mencionados anteriormente, también, se realiza el análisis comparativo entre las dos modulaciones estudiadas.

De las variaciones obtenidas de longitudes y de coeficiente de PMD para los diferentes canales 1, 4 y 10, en los espectros X e Y, en el formato de modulación RZ-PDPSK, se obtuvo la siguiente tabla comparativa:

Modulación	Espectro	Parámetro	Error
<b>RZ-PDPSK1</b>	X	LONGITUD	0.01717
		PMD	0.007648
	Y	LONGITUD	0.002989
		PMD	0.007242
<b>RZ-PDPSK4</b>	X	LONGITUD	0.003261
		PMD	0.009001
	Y	LONGITUD	0.003159
		PMD	0.003579
<b>RZ-PDPSK10</b>	X	LONGITUD	0.02813
		PMD	0.01206
	Y	LONGITUD	0.00116

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

		PMD	0.003051
--	--	-----	----------

Tabla 4. 2 Errores espectro: Longitud y Coeficiente PMD, RZ-PDPSK.

A partir de la Tabla 4. 2, se realiza la gráfica mostrada en la Figura 4. 1 , esto nos muestra; que el espectro en X, es afectado en una proporción mayor, por las variaciones de longitud (curva roja), a diferencia de las variaciones del coeficiente de PMD (curva amarilla), cuando se está implementado el formato de RZ-PDPSK, a 1 canal, y mucho mayor a 10 canales, a comparación, de cuando se trabaja a 4 canales como se muestra en el componente X del espectro en variaciones de longitud(curva roja), además, la componente Y del espectro, es afectado en mayor medida por la variación del coeficiente de PMD (curva azul), que por la variación de la longitud (curva negra), con lo anterior se puede concluir que: el espectro en X es más afectado que el espectro en Y; también, que se ve más afectado el enlace cuando se trabaja a 1 canal y a 10 canales, tanto en el componente X como Y del espectro.

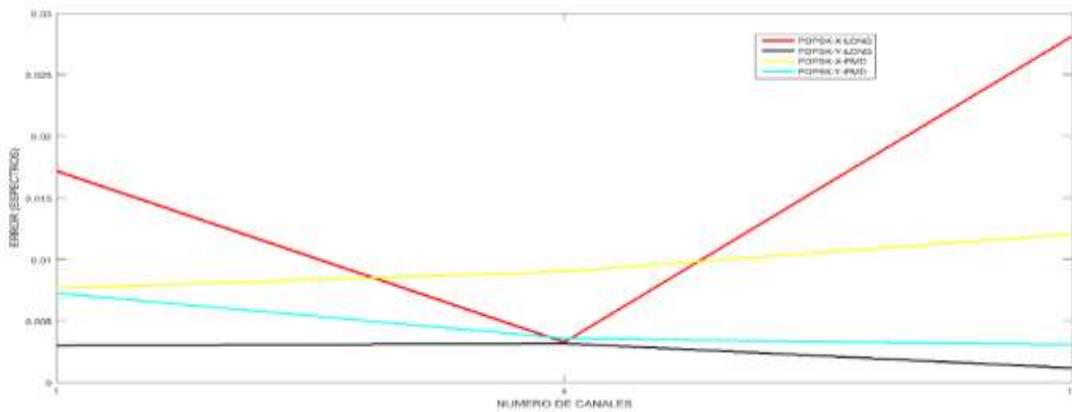


Figura 4. 1 Errores de los Espectros: Longitud y Coeficiente de PMD

De las variaciones de longitudes y de coeficiente de PMD para los diferentes canales 1, 4 y 10, en los espectros X e Y, en el formato de modulación RZ-DQPSK, se obtuvo la siguiente tabla comparativa:

Modulación	Espectro	Parámetro	Error
RZ-DQPSK1	X	LONGITUD	0.01959
		PMD	0.03109
	Y	LONGITUD	0.00708
		PMD	0.001875
RZ-DQPSK4	X	LONGITUD	0.000173
		PMD	0.0001808
	Y	LONGITUD	0.003031
		PMD	0.0001191
RZ-DQPSK10	X	LONGITUD	0.005449
		PMD	0.000121
	Y	LONGITUD	0.0001269

		PMD	0.0001484
--	--	-----	-----------

Tabla 4. 3 Errores espectro: Longitud y Coeficiente PMD, en DQPSK

A partir de la Tabla 4. 3, se realiza la gráfica mostrada en la Figura 4. 2, esta grafica nos muestra, que el espectro X, es afectado en una proporción mayor, por las variaciones del coeficiente de PMD (curva amarilla), a diferencia de las variaciones de longitud (curva roja), también se puede observar en la gráfica: las variaciones de longitud afectan mucho más al componente X del espectro, cuando se tiene 1 canal que cuando se tienen 4 o 10 canales; además, la componente Y del espectro, es afectado en mayor medida por las variaciones de longitud (curva negra), que por las variaciones de coeficiente de PMD (curva azul), con lo anterior se puede concluir que: el espectro en X es más afectado que el espectro en Y, también, que se ve más afectado el enlace cuando se trabaja a 1 canal y a 10 canales, tanto en el componente X como Y del espectro.

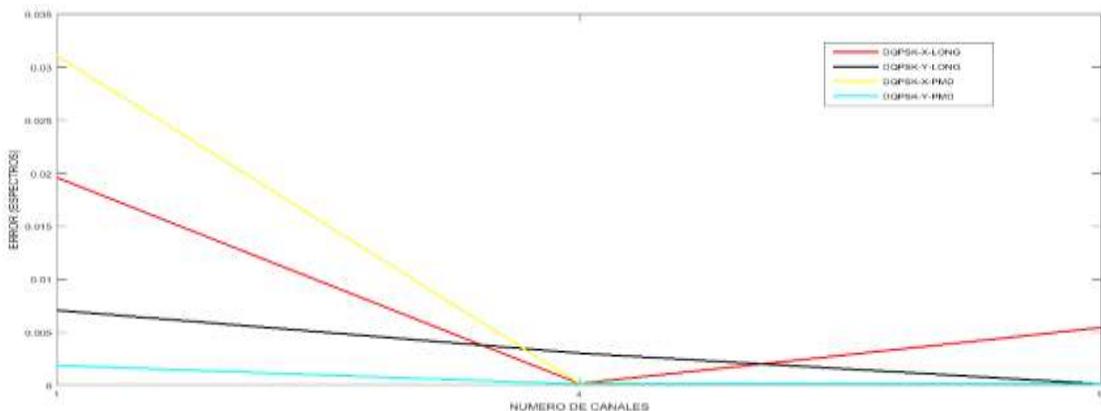


Figura 4. 2 Errores de los Espectros: Longitud y Coeficiente de PMD

Las variaciones de DGD vs la longitud, en los formatos de modulación RZ-PDPSK Y RZ-DQPSK, encontrando que la variación que se evidencia en cada una de las figuras: presenta una similitud de resultados en cada una de ellas, esto es debido a que no presentan un comportamiento del tipo  $\sqrt{L}$ , ya que esta es una idealización estadística para una serie de parámetros determinados muy específicos, lo anterior es causado por la variación de la longitud, fuera de los parámetros máximos, mostrando la DGD un comportamiento aleatorio, a consecuencia de la PMD, con lo anterior se puede concluir que para los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, en la variación de DGD vs la longitud, presenta un comportamiento igual.

De las gráficas de error cuadrático medio, que se encontraron para cada escenario de simulación y para cada componente del espectro de las pendientes de la regresión lineal aplicadas, se genera la Tabla 4. 4.

Modulación	Espectro X	Espectro Y	Resultante
RZ-DQPSK	-0.004013	0.003847	-1.66e-4
RZ-PDPSK	-0.08558	0.08245	-3.13e-3

Tabla 4. 4 Diferencia de los espectros para RZ-PDPSK y RZ-DQPSK

Estas diferencias para cada escenario de simulación, al ser negativas nos están representando que el espectro resultante en lugar de deformarse, tiende a parecerse al caso de referencia, que sería el B2B respectivo.

En otras palabras, bajo las condiciones de configuración de cada uno de los elementos que se dispusieron, para cada escenario de simulación, la PMD estaría actuando a esta velocidad binaria (10 Gbps) como un compensador para perturbaciones de primer orden.

De esta manera la modulación RZ-PDPSK presenta una diferencia más grande en su valor absoluto, lo cual significa, que realiza una compensación de perturbaciones de primer orden, de una manera más efectiva, a diferencia de la comparación que se podría realizar con la modulación RZ-DQPSK.

### **HALLAZGOS DESFASES TEMPORALES (DELAYS )**

En el proceso de observación y análisis del comportamiento de los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, a 10 Gbps, sobre su respuesta eléctrica a la salida del receptor, se encontró que la forma de la señal, a pesar de las variaciones de PMD, no sufría grandes modificaciones, pero se evidenció que existía desfases temporales entre modificaciones de PMD adyacentes.

Lo anterior se encontró, realizando modificaciones de los parámetros de configuración, del visualizador eléctrico, a la salida de los moduladores (receptor), como se muestra en la Figura 4. 3, tomando que cada modulación tiene una configuración propia, para RZ-PDPSK, se modifica el parámetro *End Time= 0,5 ns*, y para RZ-DQPSK se modifica el parámetro *End Time= 1 ns*, con el fin de observar estas variaciones en una ventana temporal lo más pequeña posible.

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

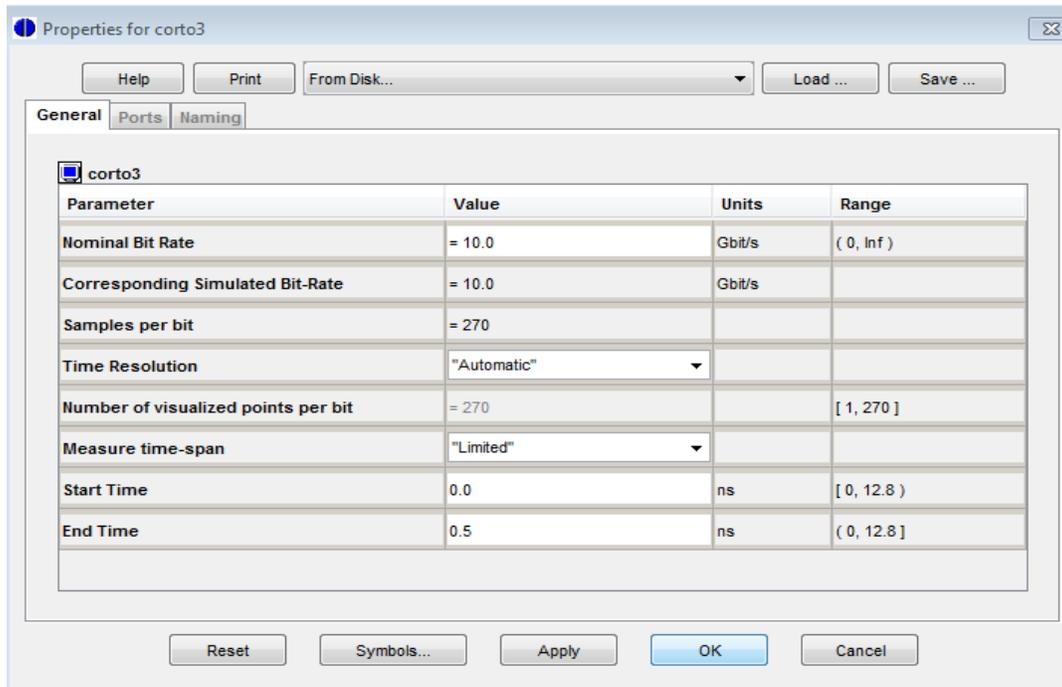


Figura 4. 3 Configuración parámetros visualizador eléctrico

A partir de las modificaciones de los parámetros mostrados en la Figura 4. 3, se obtuvo la Figura 4. 4, que muestra el desfase sufrido de las señales eléctricas, a la salida del visualizador eléctrico, por la variación de la PMD.

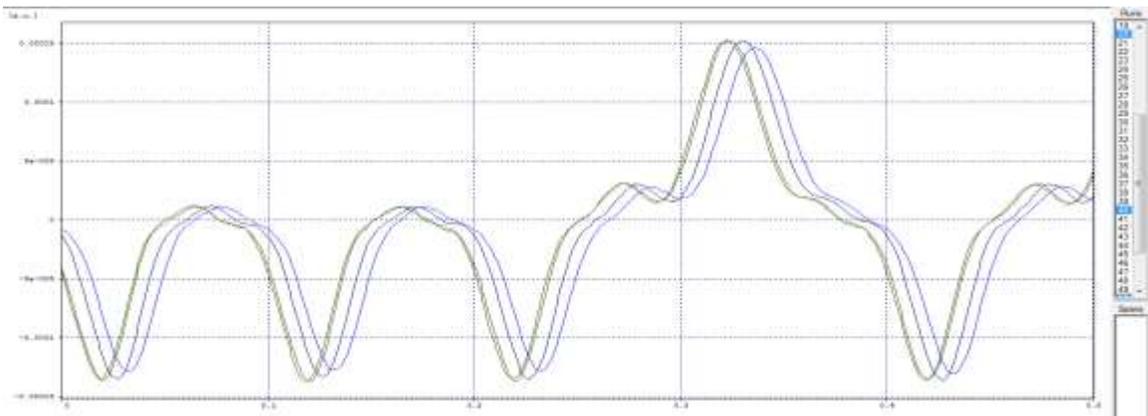


Figura 4. 4 Desfase de señales eléctricas a la salida del visualizador eléctrico

En la Figura 4. 5, se muestra la ampliación de la Figura 4. 4, en la cual se observan dos valores distintos de la PMD, verificando así, que existe un claro desfase entre las dos curvas.

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

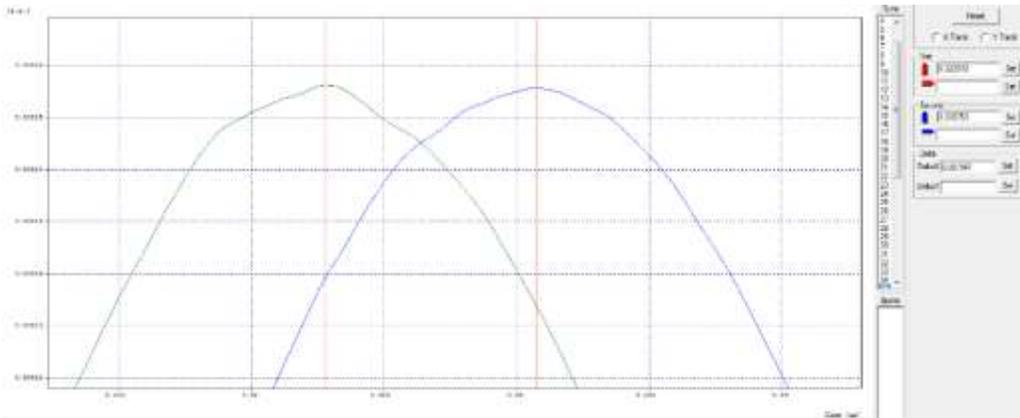


Figura 4. 5 Ampliación Figura 4. 4

A partir de lo anterior, se realizaron las simulaciones del capítulo 3, variando número de canales (1, 4 y 10), longitudes (0- 6000 Km), coeficiente de PMD (0- 1,1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ), encontrando un valor máximo (pico), de la señal eléctrica para cada variación y su correspondiente tiempo, posteriormente haciendo una diferencia con el tiempo en que se produce un pico en la señal eléctrica B2B.

Con lo anterior se obtuvieron las variaciones siguientes:

a) Para 1 canal:

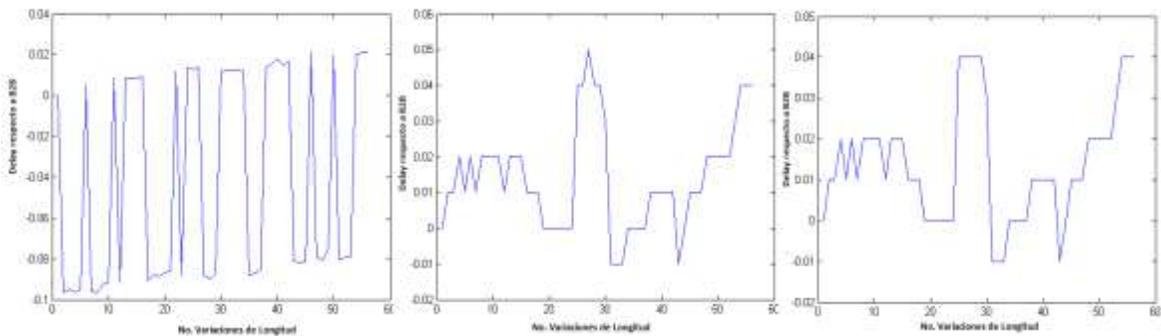


Figura 4. 6 Delays con respecto B2B vs No. Variaciones longitud- a) RZ-PDPSK b) P-fase RZ-DQPSK c) Q-cuadratura-RZ-DQPSK- para 1 canal

## Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

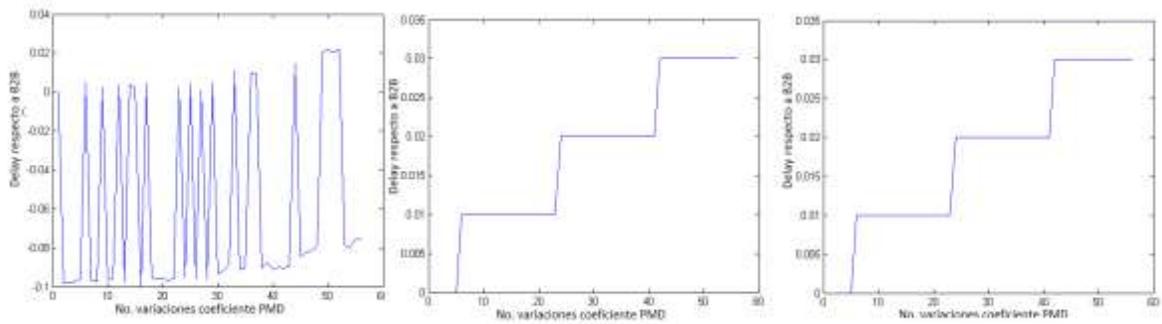


Figura 4. 7 Delays con respecto B2B vs No. Variaciones coeficiente PMD- a) RZ-PDPSK b) P-fase RZ-DQPSK c) Q-cuadratura-RZ-DQPSK- para 1 canal

Mediante el uso de la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab, se realizó una regresión lineal de las figuras anteriores, obteniendo los resultados de las regresiones lineales, por medio de la ecuación 3.2.

Los resultados obtenidos de la regresión lineal mediante la ecuación 3.2, donde cabe resaltar, que el parámetro  $p_1$  es el de mayor importancia, porque da el peso de la variación del Delay con respecto a cada variación en particular.

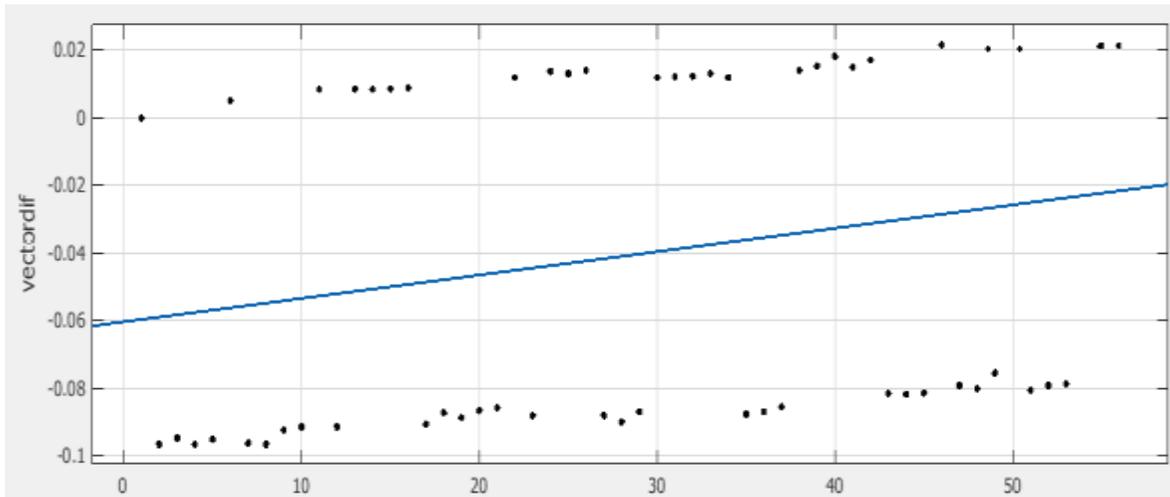


Figura 4. 8 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para 1 canal- RZ-PDPSK

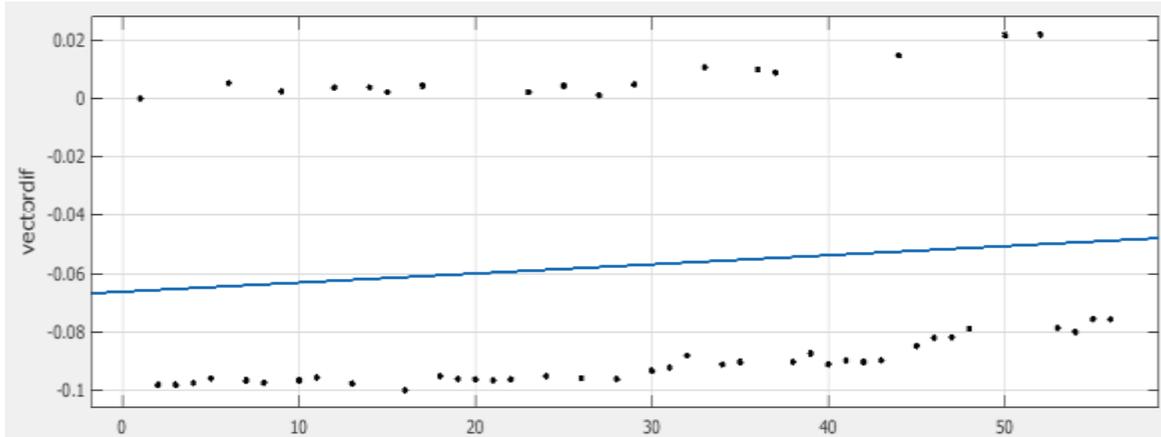


Figura 4. 9 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 1 canal- RZ-PDPSK

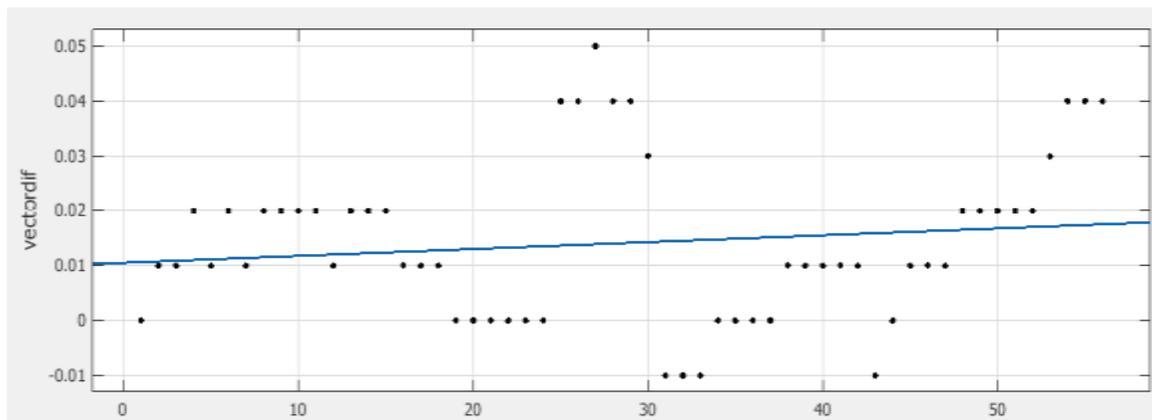


Figura 4. 10 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para 1 canal- RZ-DQPSK-P (fase)

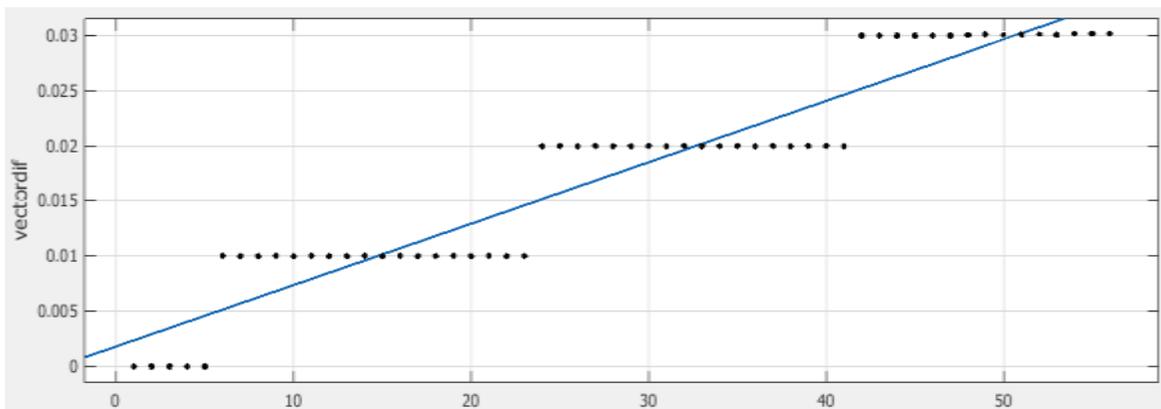


Figura 4. 11 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para 1 canal- RZ-DQPSK-Q (cuadratura)

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

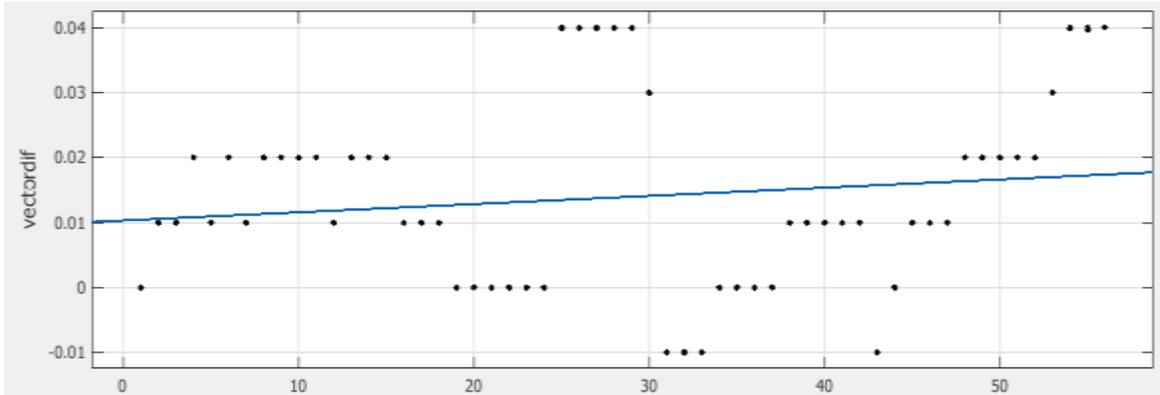


Figura 4. 12 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 1 canal- RZ-DQPSK-P (fase)

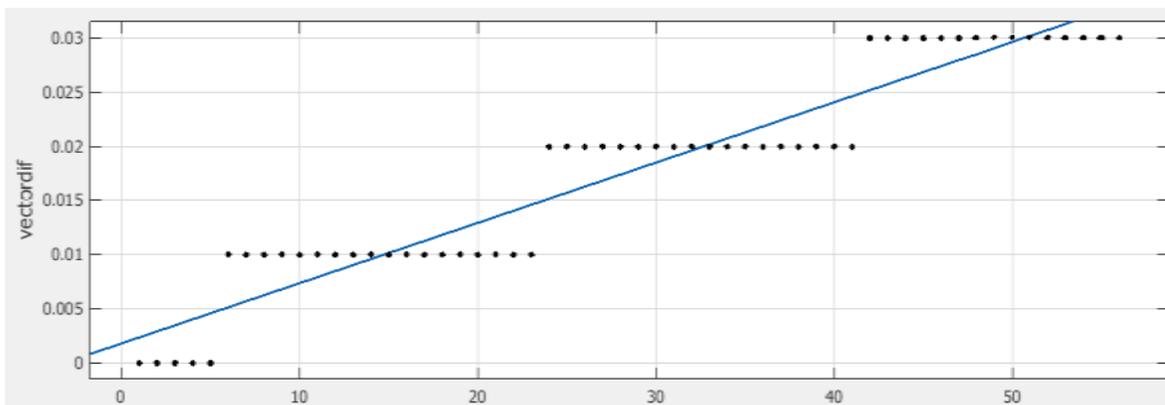


Figura 4. 13 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 1 canal- RZ-DQPSK-Q (cuadratura)

a) Para 4 canales:

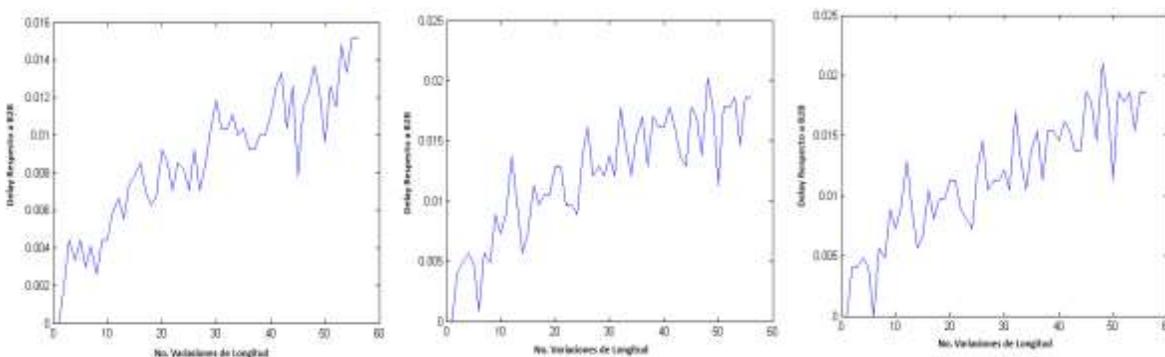


Figura 4. 14 Delays con respecto B2B vs No. Variaciones longitud- a) RZ-PDPSK b) P-fase RZ-DQPSK c) Q-cuadratura-RZ-DQPSK- para 4 canales

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

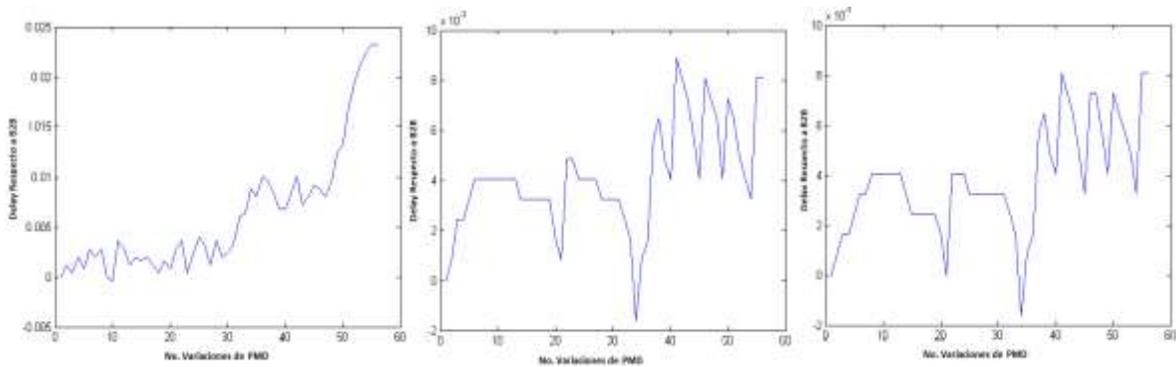


Figura 4. 15 Delays con respecto B2B vs No. Variaciones coeficiente PMD- a) RZ-PDPSK b) P-fase RZ-DQPSK c) Q-cuadratura-RZ-DQPSK- para 4 canales

Mediante el uso de la herramienta Curve Fitting Toolbox de Matlab, se realizó una regresión lineal de las figuras anteriores, obteniendo los resultados de las regresiones lineales, por medio de la ecuación 3.2.

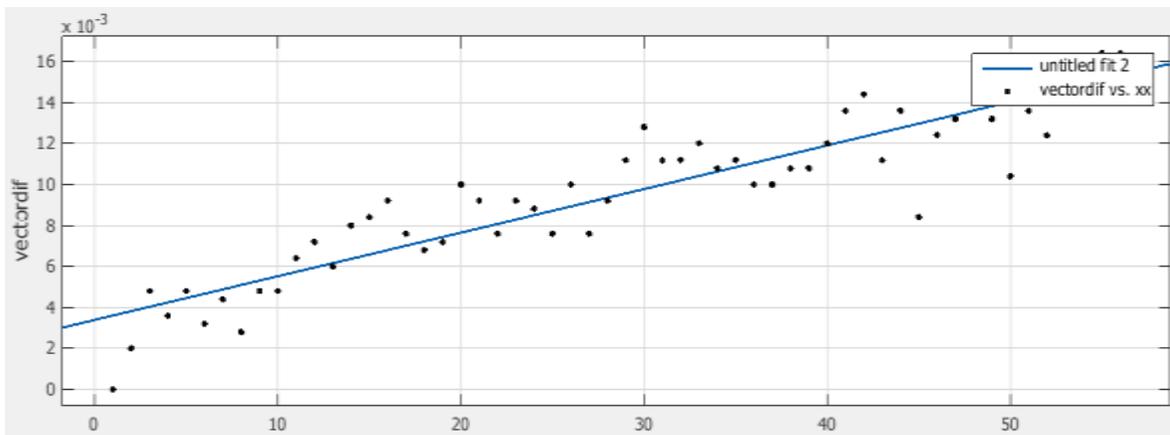


Figura 4. 16 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para 4 canales- RZ-PDPSK

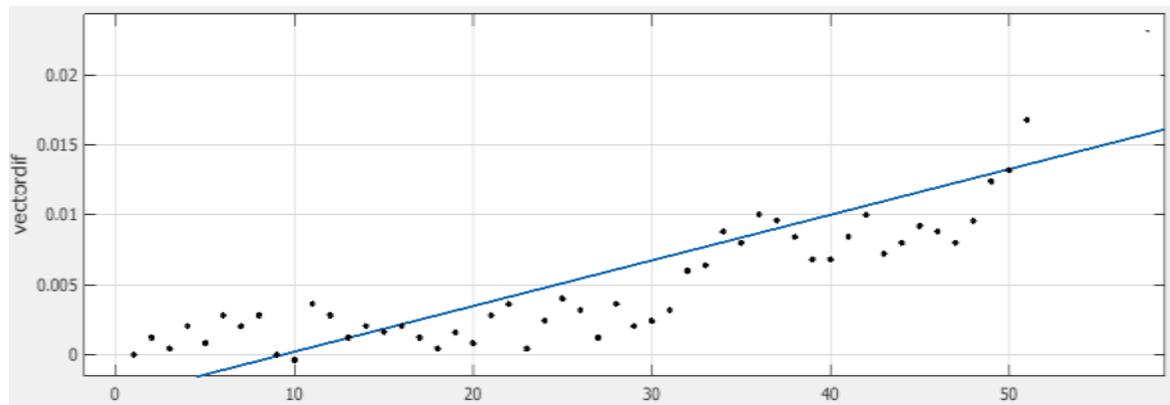


Figura 4. 17 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 4 canales- RZ-PDPSK

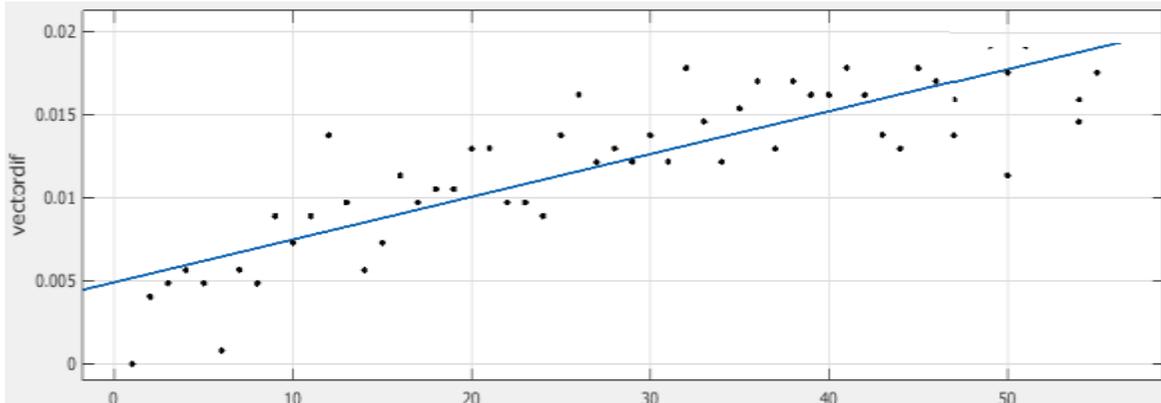


Figura 4. 18 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para para 4 canales - RZ-DQPSK-P (fase)

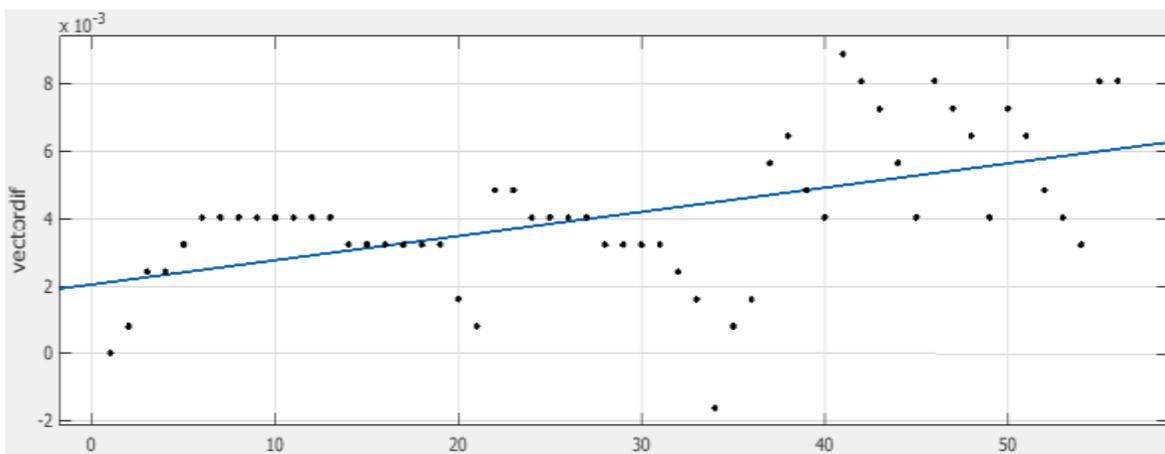


Figura 4. 19 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para para 4 canales - RZ-DQPSK-Q (cuadratura)

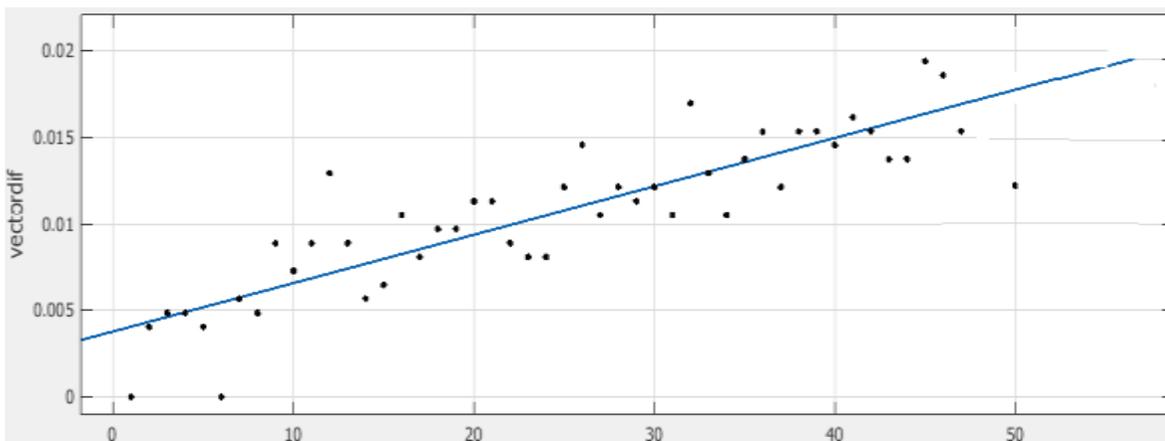


Figura 4. 20 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para para 4 canales - RZ-DQPSK-P (fase)

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

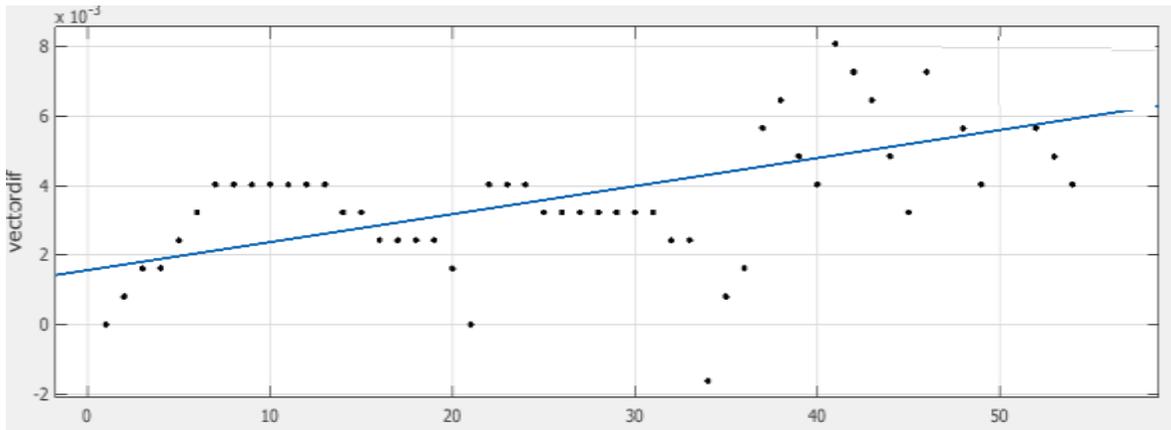


Figura 4. 21 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 4 canales- RZ-DQPSK-Q (cuadratura)

b) Para 10 canales:

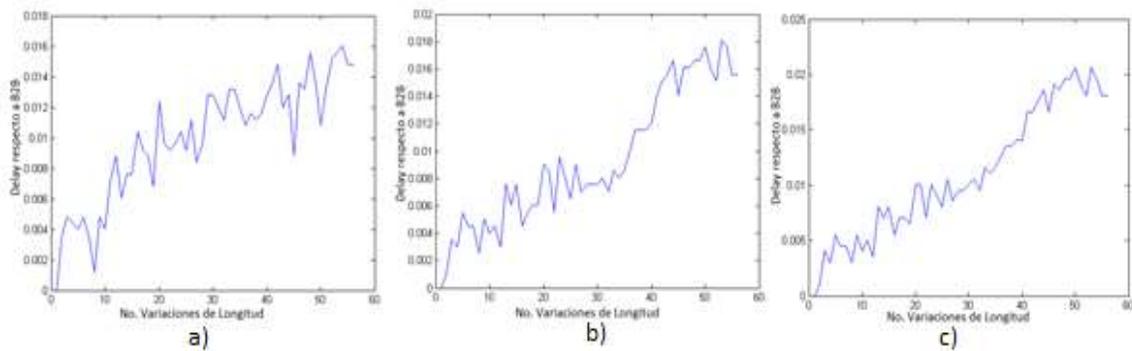


Figura 4. 22 Delays con respecto B2B vs No. Variaciones longitud- a) RZ-PDPSK b) P-fase RZ-DQPSK c) Q-cuadratura-RZ-DQPSK- para 10 canales

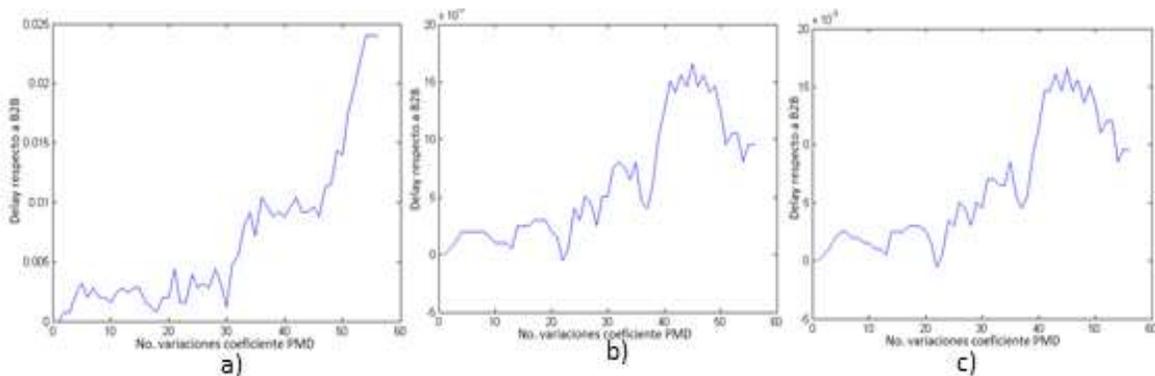


Figura 4. 23 Delays con respecto B2B vs No. Variaciones coeficiente PMD- a) RZ-PDPSK b) P-fase RZ-DQPSK c) Q-cuadratura-RZ-DQPSK- para 10 canales

Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

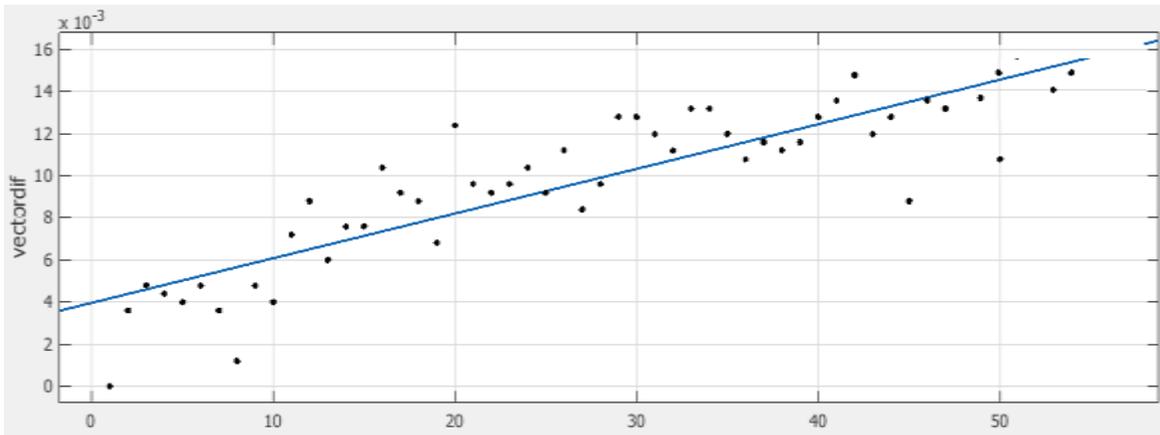


Figura 4. 24 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para 10 canales- RZ-PDPSK

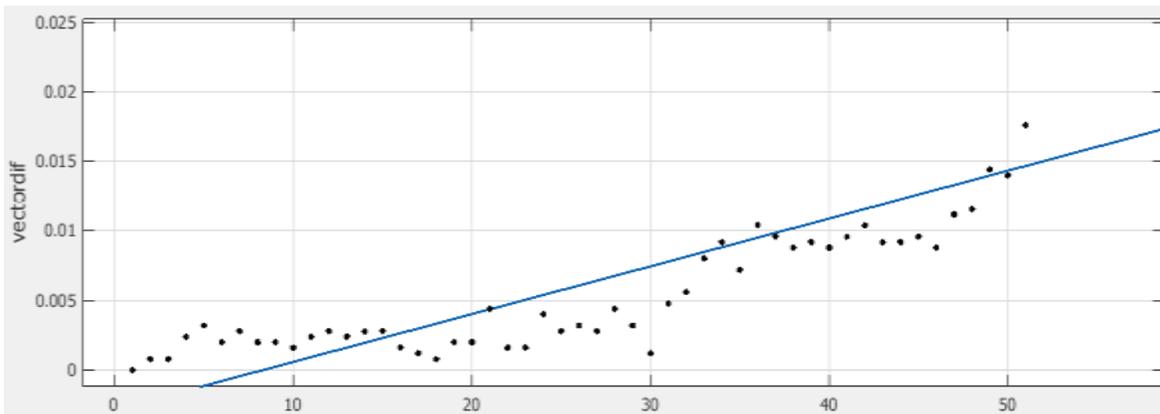


Figura 4. 25 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 10 canales- RZ-PDPSK

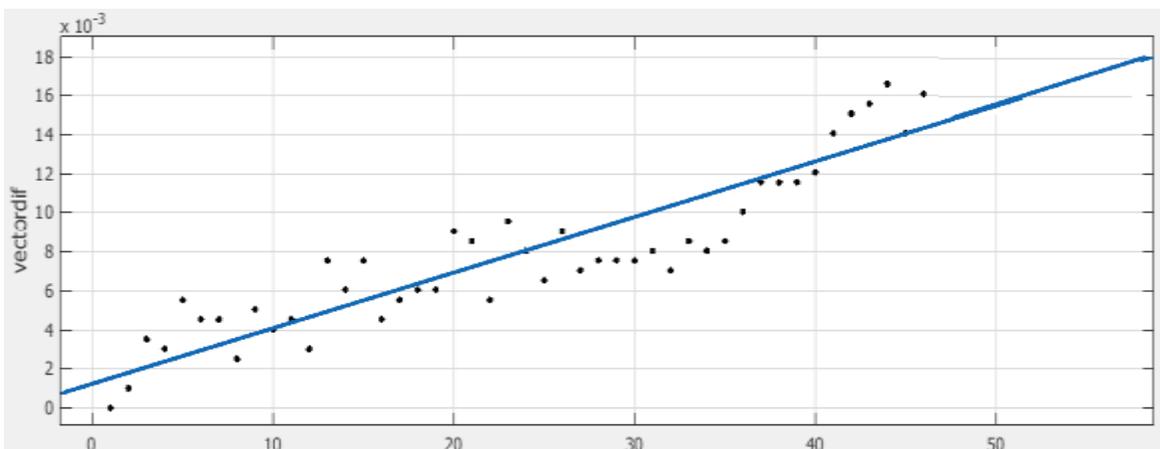


Figura 4. 26 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para 10 canales- RZ-DQPSK-P (fase)

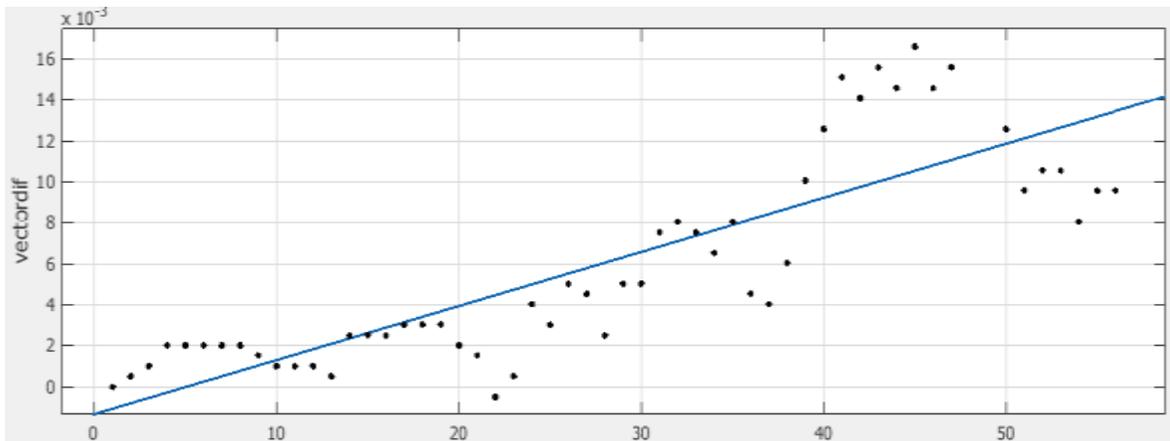


Figura 4. 27 Regresión lineal del Delay vs variación de longitud, para 10 canales- RZ-DQPSK-Q (cuadratura)

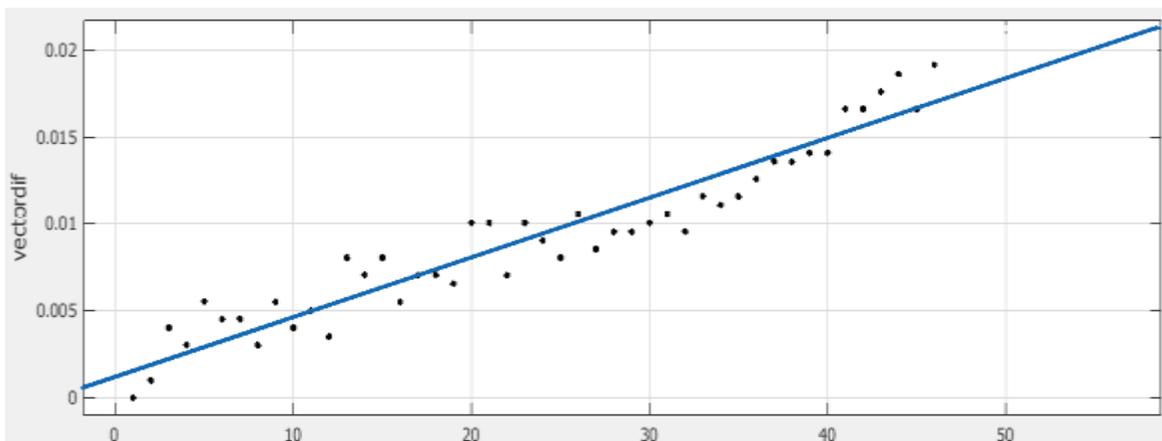


Figura 4. 28 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 10 canales- RZ-DQPSK-P (fase)

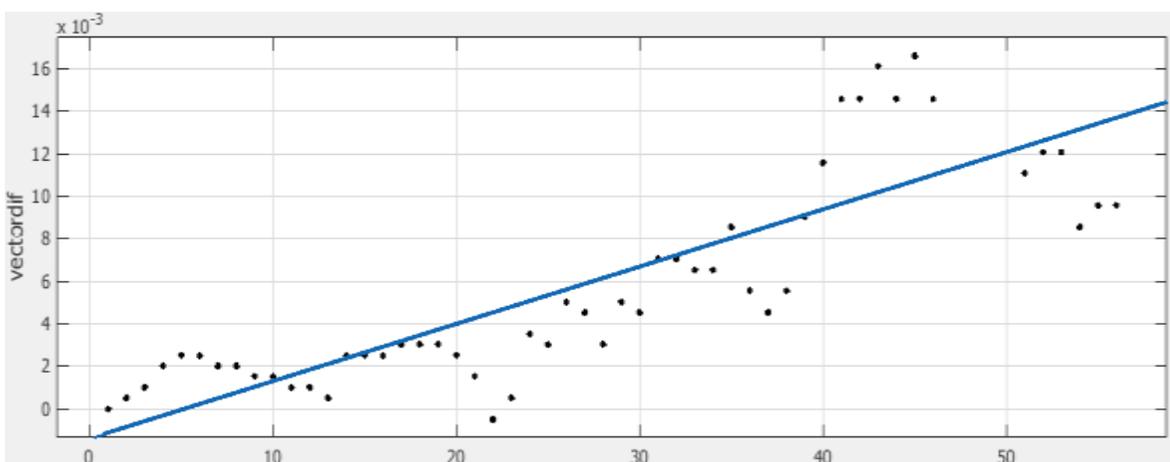


Figura 4. 29 Regresión lineal del Delay vs variación de coeficiente de PMD, para 10 canales- RZ-DQPSK-Q (cuadratura)

Con los resultados obtenidos anteriormente, se realizaron las siguientes tablas: Tabla 4. 5, Tabla 4. 6, las cuales indican las pendientes de las regresiones lineales de los delays, tanto para RZ-PDPSK, como para RZ-DQPSK.

PDPSK	LONGITUD			COEFICIENTE PMD		
No. CANALES	1	4	10	1	4	10
	0,000692	0,000213	0,000212	0,000313	0,000327	0,000343

Tabla 4. 5 Pendientes de la regresión lineal de los delays RZ-PDPSK

DQPSK	LONGITUD			COEFICIENTE PMD		
No. CANALES	1	4	10	1	4	10
FASE	0,000125	0,000257	0,000285	0,000557	7,18E-05	0,000264
CUADRATURA	0,000127	0,00028	0,000341	0,000557	8,06E-05	0,00027

Tabla 4. 6 Pendientes de la regresión lineal de los delays RZ-DQPSK

A partir de la Tabla 4. 5 y Tabla 4. 6, se generan las Figura 4. 30 y Figura 4. 31, que corresponde a las variaciones de la pendiente vs las variaciones de la longitud y los coeficientes de PMD, respectivamente.

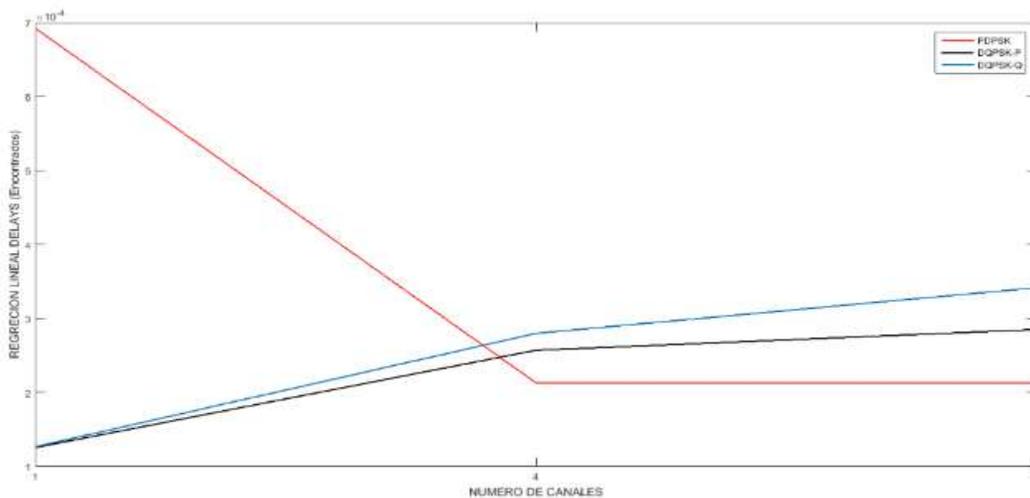


Figura 4. 30 Variaciones de pendiente vs longitud

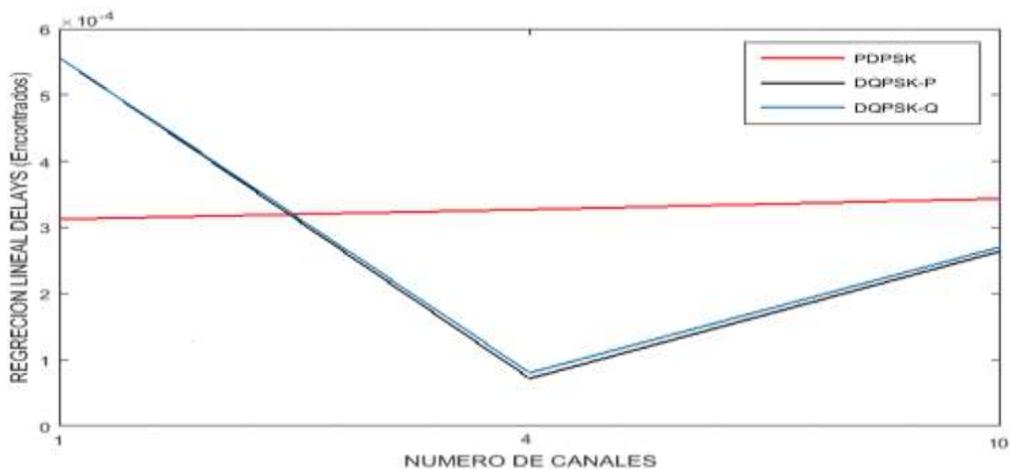


Figura 4. 31 Variaciones de pendiente vs coeficiente de PMD

Se puede concluir que los delays temporales afecta en su mayoría a sistemas compuestos por un canal. Para PDPSK existe una variación un poco más lenta de los delays y por el contrario para DQPSK tiene una mayor tolerancia a la PMD con respecto a los delays con respecto al caso B2B.

Los desfases que se presentaron anteriormente, dentro de la literatura, artículos, trabajos de grado, entre otros, no se encontró ninguna lectura referente a ellos, suponiendo que, debido a que la PMD afecta en un inicio al espectro óptico, adelantando o atrasando componentes de este, en forma estocástica, no se había hecho observaciones y menos estudios sobre este fenómeno eléctrico a la salida del receptor de cada uno de los escenarios de simulación, que se presenta a causa de la PMD.

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del presente proyecto de grado, fundamenta su temática para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en el Análisis Comparativo del Desempeño de Formatos de Modulación ( RZ-DQPSK, RZ-PDPSK) para Redes DWDM a 10 Gbps y su Tolerancia Frente a la PMD.

En el presente capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros. Las conclusiones son resultado de los objetivos y el trabajo desarrollado para alcanzarlos, las recomendaciones y trabajos futuros son producto de la metodología y ejecución de la simulación.

### 5.1 CONCLUSIONES

- Mediante la caracterización de los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, se realizó un análisis comparativo de la implementación de estos, en un modelo simplificado de una red DWDM a 10 Gbps, para determinar cuál de los formatos contribuye a una mejor solución en cuanto a la relación costo-eficiencia, para ser implementado en redes de fibra óptica. De acuerdo a lo anterior, se determinó cual es el efecto de la PMD sobre una red DWDM a 10 Gbps y cuál es la tolerancia de cada uno de estos formatos frente a la PMD.
- La PMD aislada no afecta significativamente los parámetros de desempeño (Q y BER) de los formatos de modulación RZ-PDPSK y RZ-DQPSK, ya que los resultados de estos parámetros siempre se mantuvieron por encima de sus valores óptimos (mayores a, BER=  $10^{-12}$  y Q  $\approx 17$  dB).
- Con los resultados obtenidos, a nivel de simulación, se comprobó que el formato de modulación RZ-DQPSK, presenta una mejor tolerancia a la PMD, en una red DWDM a 10 Gbps, frente a la modulación RZ-PDPSK, ya que a nivel espectral, RZ-DQPSK presentaba una menor variación de la forma del espectro, a comparación a la presentada en RZ-PDPSK, también, a la salida del receptor RZ-DQPSK, se encontró una menor variación del desfase temporal, con respecto a cada caso de estudio en comparación con el caso B2B, a diferencia de la salida del receptor RZ-PDPSK.
- El principal efecto de la PMD sobre las redes ópticas es un desfase en la velocidad de grupo que afecta de manera desigual a las componentes del espectro óptico, estos desfases o delays se encontraron con el fin de descubrir el valor de DGD límite que propone la ITU, que es del 10% de la ranura temporal de un bit para tener una penalidad menor de 1 dB.
- En transmisiones a 10Gbps, el efecto distorsivo de la PMD es muy bajo, y tiende a comportarse como un efecto compensador de CD, lo cual se encontró por medio del análisis de las tendencias de las pendientes de las dos modulaciones estudiadas.
- Las modulaciones RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, presentan comportamientos similares frente a la PMD en la parte del canal óptico debido a que en esencia estas están basadas en DPSK.
- Con el análisis de los resultados obtenidos en la simulación, se encontraron que las diferentes formas de disminuir el impacto de la PMD, se da por medio de la implementación de los cuatro casos de simulación, dependiendo de la variación de los diferentes parámetros de cada caso.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- El presente proyecto de grado, es de gran utilidad para el desarrollo de nuevos proyectos de telecomunicaciones, especialmente en el área de fibra óptica y para los operadores de redes que deseen aumentar la capacidad de sus redes DWDM, implementando los formatos de modulación analizados.
- Para el desarrollo del proyecto de grado, es necesario definir una metodología de simulación, para seguir pasos y un orden, para desarrollar con mayor facilidad la estructura de este y obtener los mejores resultados posibles, de acuerdo a lo planteado en los objetivos del proyecto de grado.
- De acuerdo a las pruebas realizadas en el presente proyecto de grado, para obtener resultados confiables, se recomienda ejecutar las simulaciones con un número de muestras igual a 270 y 12.5 ns de tiempo de simulación y con una gran cantidad de parámetros recolectados al simular cada escenario.

## 5.3 TRABAJOS FUTUROS

A través del cumplimiento de los objetivos del proyecto de grado, fue posible identificar nuevas investigaciones a partir de estos formatos de modulación:

- Analizar comparativamente el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK a velocidades de transmisión mayores a 10Gbps, y su tolerancia frente a la PMD.
- Realizar el mismo análisis elaborado en el presente proyecto de grado, para la modulación RZ-DQPSK, a niveles superiores.
- Realizar y evaluar, el desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK a 10Gbps, y su tolerancia frente a la PMD, a nivel de pruebas de campo.
- Analizar y evaluar el desempeño de diferentes formatos de modulación, ante los efectos de la PMD.
- Analizar y evaluar, a nivel de simulación diferentes formas de disminuir el impacto de la PMD, de redes DWDM a velocidades mayores de 10 Gbps.

## REFERENCIAS

- [1] D. ALzate, ""Retos en la transmisión de 40/100 Gbps sobre fibra ótica", " *Revista en Telecomunicaciones e Informática* , vol. 1, no. 2, pp. 23-60, Jul- Oct 2011 .
- [2] A. Galtarossa, Polarization Mode Dispersion, Lyngby, Denmark: Board.
- [3] H. Rosenfeldt, "PMD Tolerance Testing of Optical Interfaces," [Online]. Available: <http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7522EN.pdf>.
- [4] C. Garcia, "DWDM y CWDM," 31 OCTUBRE 2012. [Online]. Available: Disponible en: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>.
- [5] S. Garrochamba, "Multiplexación por División de Longitud de Onda," Abril 2012. [Online]. Available: <http://es.scribd.com/doc/89995790/Multiplexacion-por-division-de-longitud-de-onda#scribd>.
- [6] A. P. J. O. S. Marquez, *Multiplexación por División de Onda (WDM)*, no publicado.
- [7] I. D. T. S. E. A. M. Duilio Arnulfo Buelvas Peñarredonda, "REDES ÓPTICAS DWDM: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION," *Visión Electrónica* , vol. 4, no. 1, pp. 70-80, enero - Junio de 2010.
- [8] M. T. G. R. O. V. Ariel Leiva L., "EFECTOS DE LA DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) EN LA PROPAGACIÓN DE PULSOS A TRAVÉS DE FIBRAS ÓPTICAS," *REVISTA DE INGENIERIA*, vol. 15 , no. 3, pp. 336-343, 2007.
- [9] "Las Fibras Ópticas: Dispersion del Modo de Polarización," [Online]. Available: <http://lafibraoptica peru.com/las-fibras-opticas-dispersion-del-modo-de-polarizacion/>.
- [10] K. R. S. T. J. F. M. W. D. Douglas B. Murphy, "Introduction to Optical Birefringence," [Online]. Available: <http://www.microscopyu.com/print/articles/polarized/birefringence-print.html>. [Accessed march 2016].
- [11] S. T. a. M. Edwards, *AN INTRODUCTION TO THE FUNDAMENTALS OF PMD IN FIBERS*, USA: CORNING, 2006.
- [12] E. P. C. Ararat, *Analisis del Desempeño de los Formatos (RZ-NRZ)/DQPSK a 10 y 40 Gbps en una Red Metropolitana DWDM*, Popayan, Universidad del Cauca: Trabajo de Grado, Grupo GNTT, Ingeniería Electronica y Telecomunicaciones, Nov. 2012 .
- [13] M. Haris, *Advanced Modulation Formats For High-Bit-Rate Optical Networks*, Ph. D., Georgia: Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Ago. 2008.

- [14] S. F. A. R. M. T. K. P. Zetie, "How does a Mach–Zehnder interferometer work?," [Online]. Available:  
[https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie\\_et\\_al\\_mach\\_zehnder00.pdf](https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie_et_al_mach_zehnder00.pdf).
- [15] I. M. Polo, "Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies," Octubre 2010. [Online]. Available:  
[http://www.belverbrasil.com.br/site/upload/intro\\_optical\\_modulation.pdf](http://www.belverbrasil.com.br/site/upload/intro_optical_modulation.pdf).
- [16] T. Kimura, "EML vs DML for Datacenter and Client Side Transceivers," 30 Septiembre 2015. [Online]. Available: <http://blog.neophotonics.com/eml-vs-dml-for-datacenter-and-transceivers/>.
- [17] K. Ho., "Phase-Modulated Optical Communication Systems," 2005. [Online]. Available: <http://www.nikhef.nl/~d90/IfLink/documentation/PhaseModulation/front-matter.pdf>.
- [18] A. Gnauck and P. Winzer, "Optical phase-shift-keyed transmission," *Lightwave Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 115-130, Jan. 2005.
- [19] L. Nguyen, *Advanced Digital Optical Communications*, 2da Ed, Alemania: CRC Press, 2015.
- [20] P. Moreno, *Formatos de modulación avanzados para sistemas de comunicaciones ópticas coherentes*, España, Univ de Sevilla: Esc. Superior de Ingenieros, 2011.
- [21] "Back to Tool RSoft Application Gallery Note: Partial DPSK (PDPSK): Influence of MZI delay mismatch in high bitrate dispersive channels," [Online]. Available: <https://optics.synopsys.com/rsoft/application-gallery/partial-dpsk.html>.
- [22] D. Richards, S. Pavan, J. Patel and E. Ghillino, "Improved tolerance to the combined effect of in-band crosstalk and chromatic dispersion in partial DPSK systems,," *Computer Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, vol. no, no. 15th IEEE - International Workshop, pp. 71-75, 2010.
- [23] F. Heismann, "43-Gb/s NRZ-PDPSK WDM Transmission with 50-GHz Channel Spacing in Systems with Cascaded Wavelength-Selective Switches," 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5032627&queryText=43-Gb%2Fs%20NRZ-PDPSK%20WDM%20Transmission%20with%2050-GHz%20Channel%20Spacing%20in%20Systems%20with%20Cascaded%20Wavelength-%20Selective%20Switches&newsearch=true>.
- [24] M. R. P. J. F. Burbano, "Análisis del desempeño de un sistema de comunicaciones con modulación DBPSK/DQPSK basado en hardware reconfigurable," Diciembre 2014. [Online]. Available:

[http://web.usbmed.edu.co/usbmed/fing/v5n2/pdf/Articulo\\_Analisis\\_SComunicaciones\\_DB\\_PSK](http://web.usbmed.edu.co/usbmed/fing/v5n2/pdf/Articulo_Analisis_SComunicaciones_DB_PSK).

- [25] J. Alvarado, Estudio de las principales técnicas de modulación, Puebla, Mex: Tesis de Grado, Depto de Ingeniería Electrónica, Univ. de las Américas Puebla, 2005.
- [26] B. Mikkelsen, "PARTIAL DPSK (PDPSK) TRANSMISSION SYSTEMS". United States Patent US 2007/0196110 A1, 23 Aug. 2007.
- [27] I. J. B. L. M. A. T. T. Ing. Andrés Escallón P., "INCIDENCE PARAMETERS WHICH AFFECT OPTICAL SIGNAL QUALITY ON," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, no. 12, 2008.
- [28] C. C. K. Chan, Optical Performance Monitoring, China: Academic Press, 2011.
- [29] C. B. Pharos, "Diseño de sistemas ópticos para comunicaciones de alta capacidad (primera parte)," vol. 11, no. 2, pp. 37-50, Nov. - Dic. 2004.
- [30] F. Apablaza, "Comunicaciones Ópticas Fundamentos - Capitulo 4," Septiembre 2010. [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/fapablaza/redes-de-transporte-pticas-c4-fam-ss>.
- [31] i. Rsoft-Desing Group, Optsim-Guide, Rsof Desing Group, 1989-2010.
- [32] B. L. H.-. P. R. Hernday, *MEASUREMENT OF POLARIZACION- MODE DISPERSION*, HEWLETT-PACKARD COMPANY, 1995, pp. 27-33.
- [33] ITU-T, Recommendation ITU-T G.652, ITU-T , 2009.
- [34] G. G. –. J. F. Grijalba, *Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM*, Popayán - Cauca.
- [35] HUAWEI, Multi-Service Transfer Platform, HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.
- [36] ITU-T Rec.G.Supplement39, "Optical system design and engineering considerations," TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, 2012.
- [37] "OptSim User Guid," Inc, RSoft Design Group, New York, USA, 2004.
- [38] J. J. P. Agredo y H. J. Ordoñez, *Análisis del desempeño en redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales*, Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del cauca, Colombia, 2010.
- [39] ITU-T, *Recommendation ITU-T G.694.1*, ITU-T, 2012.

- [40] P. Moreno, *FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS COHERENTES*, Sevilla: PROYECTO FIN DE CARRERA - UNIVERSIDAD DE SEVILLA - ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS, Junio 2011.
- [41] J. A. D. Ossa, Informe de Teoría de Comunicaciones Digitales Análisis de Diagramas de Ojo, Univ. Técnica Federico Santa María, Nov. , 2002.