

**IMPACTO DEL FORMATO DE MODULACIÓN SOBRE LA ISD EN UNA RED
DWDM A 10 Gbps Y 40 Gbps**

**DIANA CAROLINA EGUIZABAL M.
INGRID ANDREA MUÑOZ V.**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES - GNTT
POPAYÁN
2015**

**IMPACTO DEL FORMATO DE MODULACIÓN SOBRE LA ISD EN UNA RED
DWDM A 10 Gbps y 40 Gbps**

**DIANA CAROLINA EGUIZABAL M.
INGRID ANDREA MUÑOZ V.**

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

Director: Ing. JOSE GIOVANNY LOPEZ P.
Ph.D.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES - GNTT
POPAYÁN
2015**

CONTENIDO

	Pág.
1. GENERALIDADES	19
1.1 SISTEMAS WDM	19
1.1.1 Sistemas CWDM.	21
1.1.2 Sistemas DWDM.	21
1.2 FORMATOS DE MODULACIÓN	23
1.2.1 Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK, Amplitude Shift Keying).	24
1.2.2 Modulación por desplazamiento diferencial de fase (DPSK, Differential Phase-Shift Keying).	25
1.2.3 Modulación por desplazamiento por cuadratura diferencial de fase (DQPSK, Differential Quadrature Phase-Shift Keying).	26
1.2.4 No retorno a cero (NRZ, No Return to Zero).	27
1.2.5 Retorno a cero (RZ, Return to Zero).	28
1.3 FORMATOS DE MODULACION CON MAYOR IMPLEMENTACION DENTRO DE LAS REDES DWDM	31
1.3.1 NRZ-OOK	31
1.3.2 RZ-DPSK	32
1.4 DENSIDAD ESPECTRAL DE INFORMACIÓN	33
1.4.1 Teorema de Shannon y Hartley de la capacidad del canal	33
2. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	38
2.1 EFECTOS LINEALES Y NO LINEALES EN SISTEMAS OPTICOS	38
2.1.1 Análisis de los efectos lineales	38
2.1.2 Análisis de los efectos no lineales	39
2.2 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	41
2.3 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO (OPM, <i>Optical Performance Monitoring</i>)	42
2.3.1 Parámetros de desempeño óptico	43
2.3.2 Parámetros de monitoreo óptico	45
2.3.3 Técnicas de monitoreo óptico	45

2.4 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	47
2.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	51
3. DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO	53
3.1 PLAN DE PRUEBAS	53
3.2 PROCESO DE SIMULACIÓN	53
3.3 DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS Y CASOS DE ESTUDIO	55
3.3.1 Escenario 1: Formato de modulación NRZ-OOK	55
3.3.1.1 Caso de Estudio 1: Formato de modulación NRZ-OOK con 4 canales a 2.5 GHz.	55
3.3.1.2 Caso de Estudio 2: Formato de modulación NRZ-OOK, Velocidad de 40 Gbps en 16 Longitudes de Onda de 2.5 Gbps.	72
3.3.2 Escenario 2: Formato de modulación RZ-DPSK	87
3.3.2.1 Caso de Estudio 3: Formato de modulación RZ-DPSK con 4 canales a 2.5 GHz.	88
3.3.2.2 Caso de Estudio 4: Formato de modulación RZ-DPSK, Velocidad de 40 Gbps en 16 Longitudes de Onda de 2.5 Gbps	100
4. IMPACTO DEL FORMATO DE MODULACION SOBRE LA ISD EN UNA RED DWDM A 10 GBPS Y 40 GBPS A NIVEL DE TRANSPORTE.	113
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	128
5.1 CONCLUSIONES	129
5.2 RECOMENDACIONES	130
5.3 TRABAJOS FUTUROS	130
REFERENCIAS	132

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM [3].	20
Tabla 2. Tabla de verdad de la modulación DPSK [20].	25
Tabla 3. Transiciones de fase para la modulación DQPSK [20].	27
Tabla 4. Parámetros variables y fijos del sistema.	48
Tabla 5. Parámetros de la Fibra Corning SSMF-28 [56].	51
Tabla 6. Características generales de un escenario de Simulación.	52
Tabla 7. Parámetros Fijos del Sistema	57
Tabla 8. Datos de Simulación para 4 canales en el caso de estudio1 (Espaciamiento 100GHz).	57
Tabla 9. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).	61
Tabla 10. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	64
Tabla 11. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz) compensado al 100%, 75%, 50% y 25%.	67
Tabla 12. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%) vs Canal 195.8 THz (Espaciados a 100 GHz, sin Compensación)	68
Tabla 13. Cálculo del ancho de banda del sistema NRZ-OOK para 4 canales de 2.5GHz	71
Tabla 14. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100 GHz).	74
Tabla 15. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50 GHz)	77
Tabla 16. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz)	80
Tabla 17. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz en CASO DE ESTUDIO 2 (Espaciamiento 25GHz) compensado al 100%, 75%, 50% y 25%.	84
Tabla 18. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz (Espaciamiento 25GHz y compensación del 50%) vs Canal 195.8 THz (Espaciados a 100 GHz, sin Compensación)	84

Tabla 19. Cálculo del ancho de banda del sistema NRZ-OOK para 4 canales de 2.5GHz	87
Tabla 20. Parámetros Fijos del Sistema-Escenario 2	89
Tabla 21. Datos de Simulación para 4 canales en el caso de estudio 3 (Espaciamiento 100GHz).	90
Tabla 22. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz en el Escenario 2 - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 50GHz).	93
Tabla 23. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).	96
Tabla 24. Cálculo del ancho de banda del sistema RZ-DPSK para 4 canales de 2.5GHz.	99
Tabla 25. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 100 GHz).	102
Tabla 26. Datos de Simulación - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 50 GHz)	105
Tabla 27. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz en el - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz)	108
Tabla 28. Cálculo del ancho de banda del sistema RZ-DPSK para 4 canales de 2.5GHz	111
Tabla 29. Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto a los Parámetros de Monitoreo Óptico de los Diferentes Casos de Estudio	114
Tabla 30. Análisis Comparativo de los Formatos de Modulación con Respecto al Diagrama del Ojo y el Ancho de Banda del Sistema para los Caso de Estudio 1 y 3.	116
Tabla 31. Análisis Comparativo de los Formatos de Modulación con Respecto al Diagrama del Ojo y el Ancho de Banda del Sistema para los Caso de Estudio 2 y 4.	118
Tabla 32. Eficiencia Espectral e ISD para el Formato NRZ-OOK	120
Tabla 33. Eficiencia Espectral e ISD para el Formato RZ-DPSK	121
Tabla 34. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para NRZ-OOK con 4λ de 2.5 Gbps c/u.	123
Tabla 35. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para NRZ-OOK con 16λ de 2.5 Gbps c/u.	124
Tabla 34. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para RZ-DPSK con 4λ de 2.5 Gbps c/u.	126

Tabla 34. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para RZ-DPSK con
16λ de 2.5 Gbps c/u.

127

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de Comunicaciones Óptico WDM [2].	20
Figura 2. Espaciamiento de los Canales CWDM, recomendación ITU-T G.694.2 [5].	21
Figura 3. Representación de las longitudes de Onda en Sistemas DWDM [12].	22
Figura 4. Modulación ASK- Amplitud vs Tiempo [15].	24
Figura 5. Diagrama de constelación de modulación ASK [19].	25
Figura 6. Diagrama de constelación de la modulación DPSK [12].	26
Figura 7. Transiciones de fase para modulación DQPSK [21].	26
Figura 8. Diagrama de constelación de la modulación DQPSK [12].	27
Figura 9. Representación codificación NRZ-L y NRZ-I [22].	28
Figura 10. Representación codificación RZ [22].	29
Figura 11. Diagrama de bloques transmisor NRZ-OOK [24].	31
Figura 12. Diagrama de bloques transmisor RZ-DPSK [24].	32
Figura 13. Diagrama de constelaciones modulación binaria DPSK [27].	33
Figura 14. Diagrama Densidad Espectral de Información vs Relación Señal a Ruido [31].	36
Figura 15. Generación de frecuencias adicionales debido a FWM [27].	41
Figura 16. Parámetros Ópticos.	42
Figura 17. Definición del umbral óptimo de decisión [2].	44
Figura 18. Parámetros del Diagrama del Ojo [5].	45
Figura 19. Niveles del modelo de referencia OPM [44].	46
Figura 20. Escenarios y Casos de Estudio.	47
Figura 21. Esquema Escenarios de Simulación.	48
Figura 22. Caso de estudio 1.	49
Figura 23. Caso de estudio 2.	49
Figura 24. Caso de estudio 3.	50
Figura 25. Caso de estudio 4.	50
Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de simulación	54

	Pág.
Figura 27. Escenario 1: formato de modulación NRZ-OOK	56
Figura 28. Diagrama del Ojo del Escenario 1 en Configuración Back to Back.	56
Figura 29. Diagrama del Ojo del Escenario 1 en Configuración Back to Back.	56
Figura 30. Diagrama del Ojo en Recepción del Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).	58
Figura 31. Espectro en Recepción del Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).	58
Figura 32. Espectro óptico de entrada (Rojo) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (Cafe) - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).	59
Figura 33. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).	59
Figura 34. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).	60
Figura 35. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).	60
Figura 36. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).	61
Figura 37. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).	61
Figura 38. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).	62
Figura 39. Factor Q vs Longitud de la Fibra – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).	62
Figura 40. BER vs Longitud de la Fibra – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).	63
Figura 41. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).	63
Figura 42. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	65
Figura 43. Espectro en Recepción - Caso de Estudio (Espaciamiento 25GHz).	65
Figura 44. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	66

	Pág.
Figura 45. Factor Q vs Longitud de la - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	66
Figura 46. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	67
Figura 47. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra- Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	67
Figura 48. Diagrama del Ojo compensado al 25%- Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	69
Figura 49. Espectro compensado al 25%- Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).	69
Figura 50. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).	70
Figura 51. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).	70
Figura 52. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).	71
Figura 53. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).	71
Figura 54. Caso de Estudio 2: Formato de modulación NRZ-OOK, Velocidad de 10 Gbps en 16 Longitudes de Onda de 2.5Gbps	73
Figura 55. Diagrama del ojo Caso de Estudio 2-Configuración BACK to BACK	74
Figura 56. Espectro Caso de Estudio 2-ConFIGuración BACK to BACK	74
Figura 57. Diagrama del Ojo del Caso de Estudio 2 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).	75
Figura 58. Espectro para el Caso de Estudio 2 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).	75
Figura 59. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz).	76
Figura 60. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz).	76
Figura 61. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz).	77
Figura 62. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz).	77

	Pág.
Figura 63. Diagrama del Ojo del Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamiento 50GHz).	78
Figura 64. Espectro del Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamiento 50GHz).	78
Figura 65. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio (Espaciamiento 50GHz).	79
Figura 66. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50GHz).	79
Figura 67. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50GHz).	80
Figura 68. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50GHz).	80
Figura 69. Diagrama del ojo para Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamiento 25GHz).	81
Figura 70. Espectro del Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamiento 25GHz).	81
Figura 71. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz).	82
Figura 72. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz).	82
Figura 73. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz).	83
Figura 74. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz).	83
Figura 75. Diagrama del Ojo para espaciamiento entre canales de 25 GHz compensado al 50% - Caso de Estudio 2.	85
Figura 76. Espectro para espaciamiento entre canales de 25 GHz compensado al 50%- Caso de Estudio 2.	85
Figura 77. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 50%)	86
Figura 78. Factor Q vs Longitud de la - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 50%).	86
Figura 79. Escenario 2: formato de modulación RZ-DPSK.	88
Figura 80. Diagrama del Ojo del Escenario 2 en Configuración Back to Back.	89

	Pág.
Figura 81. Diagrama del Ojo del Escenario 2 en Configuración Back to Back	89
Figura 82. Diagrama del Ojo del Caso de Estudio 3 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).	91
Figura 83. Espectro del Caso de Estudio 3 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).	91
Figura 84. Espectro óptico de entrada (Rojo) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (Verdad) - Caso de Estudio 3.	92
Figura 85. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 3.	92
Figura 86. BER vs Longitud de la Fibra para el Caso de Estudio 3.	93
Figura 87. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra para el Caso de Estudio 3.	93
Figura 88. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 50GHz).	94
Figura 89. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 50GHz).	94
Figura 90. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.	95
Figura 91. Factor Q vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.	95
Figura 92. BER vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.	96
Figura 93. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.	96
Figura 94. Diagrama del en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).	97
Figura 95. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).	97
Figura 96. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).	98
Figura 97. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).	98
Figura 98. BER vs Longitud de la - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).	99

	Pág.
Figura 99. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).	99
Figura 100. Caso de Estudio 2: Formato de modulación NRZ-OOK, Velocidad de 10 Gbps en 16 Longitudes de Onda de 2.5Gbps	101
Figura 101. Diagrama del Ojo en Configuración Back to Back alrededor de los 195.8 THz	102
Figura 102. Espectro Óptico en Configuración Back to Back alrededor de los 195.8 THz,	102
Figura 103. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 100 GHz).	103
Figura 104. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 100 GHz).	103
Figura 105. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) (Espaciamiento 100GHz) - Caso de Estudio 4.	104
Figura 106. Factor Q vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 100GHz- Caso de Estudio 4.	104
Figura 107. BER vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 100GHz) - Caso de Estudio 4.	105
Figura 108. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 25GHz y compensación del 100%) - Caso de Estudio 4.	105
Figura 109. Diagrama del Ojo para el canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 50 GHz).	106
Figura 110. Espectro Óptico en Configuración para el canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 50 GHz).	106
Figura 111. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 4.	107
Figura 112. Factor Q vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 4.	107
Figura 113. BER vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50 GHz) - Caso de Estudio 4.	108
Figura 114. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50 GHz) v 4.	108
Figura 115. Diagrama del Ojo para el Canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).	109
Figura 116. Espectro Óptico en para el Canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).	109

	Pág.
Figura 117. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).	110
Figura 118. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).	110
Figura 119. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).	111
Figura 120. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).	111
Figura 121. Análisis Comparativo de los Formatos de Modulación con respecto al Ancho de Banda Ocupado por Canal.	113

LISTADO DE ACRÓNIMOS

BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Bits Erróneos.
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
CS	<i>Carrier-Suppressed</i> , Portadora Suprimida.
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> , Dispersion Cromatica
DPSK	<i>DifferentialPhase-Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase.
DWDM	<i>DenseWavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa.
FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones.
GNTT	Grupo de Investigación y Desarrollo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones.
IEEE	<i>Institute of Electrical andElectronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ISD	<i>Information Spectral Density</i> , Densidad Espectral de Información.
MAN	<i>Metropolitan Área Network</i> , Red de Área Metropolitana.
NGN	<i>Next Generation Networking</i> , Redes de Nueva Generación.
NRZ	<i>Non Return to Zero</i> , No Retorno a Cero.
OOK	<i>On-Off Keying</i> , Modulación Digital Binaria.
OSNR	<i>Optical Signal-To-Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Óptica.
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispensión por Modo de Polarización.
PSBT	<i>Phase Shaped BinaryTransmission</i> , Transmisión de Fase en Forma Binaria.
QPSK	<i>Quadrature PhaseShift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.

- RZ** *Return to Zero*, Retorno a Cero.
- SPM** *Self-Phase Modulation*, Auto-modulación de Fase.
- WDM** *Wavelength Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Longitud de Onda.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los formatos de modulación avanzados se han convertido en un factor dominante para el diseño de sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), permitiendo contrarrestar los efectos de degradaciones lineales y no lineales del canal de comunicación, logrando incrementar la relación señal a ruido óptica del sistema, garantizando el manejo de múltiples longitudes de onda sobre un trayecto de fibra. Anteriormente, los formatos modulados de intensidad - Modulación Digital Binaria Ej. (NRZ-OOK, *Non Return to Zero -On-Off Keying* y RZ-OOK, *Return to Zero -On-Off Keying*) fueron ampliamente utilizados en comunicaciones ópticas debido a su simplicidad de implementación y configuración, no obstante conforme las tecnologías, los servicios y las aplicaciones avanzan, las comunicaciones se hacen más exigentes, requiriendo mayores distancias y velocidades de transmisión, superando los límites de la modulación binaria.

El incremento en el ancho de banda y en la velocidad de transmisión de datos requeridos en los actuales servicios de comunicaciones ha generado la necesidad de desarrollar nuevos formatos de modulación con el fin de lograr comunicaciones robustas, eficientes y escalables, que abarquen mayores distancias y gran capacidad de tráfico. En la actualidad los sistemas DWDM han logrado un desempeño eficaz con respecto a este tipo de requerimientos ya que permiten una alta Densidad Espectral de Información (ISD, *Information Spectral Density*) logrando conducir más tráfico de datos, voz y video dentro de un mismo tramo de fibra.

En los sistemas DWDM, la capacidad global de transmisión se ha desarrollado gracias a la mejora en la densidad espectral de información, donde el incremento en la cantidad de longitudes de onda es base fundamental en las redes ópticas de nueva generación, las cuales demandan gran cantidad de servicios y altas velocidades de transmisión, además al tener diferentes longitudes de ondas multiplexadas en una única señal que viaja sobre la Fibra Óptica, se puede multiplicar la capacidad total de transmisión, por 4, 8, 16, 32 o incluso por mucho más alcanzando más de un Tera bit por segundo sobre una única fibra, una capacidad suficiente para transmitir simultáneamente 20 millones de conversaciones telefónicas de datos o fax, cada una de las señales transmitidas pueden tener una velocidad distinta y un formato diferente; al final del enlace las señales se pueden volver a discriminar y separar por longitudes de ondas.

Con el fin de regular la transmisión en redes ópticas de alta velocidad, la IEEE en su estándar 802.3ba [1], define los parámetros de control de acceso al medio, la capa física y parámetros de gestión de la operación de sistema de velocidades de 40 Gbps y 100 Gbps, en los cuales la información se transporta de manera paralela, multiplexando varias longitudes de onda sobre un mismo medio físico

que para el caso particular de este trabajo de grado es la Fibra Optica, en el cual dependiendo de las distancias o el tipo de conexión, se define el número de longitudes de onda necesarias para obtener la velocidad deseada en el sistema, a nivel de transporte (Sistema Paralelo Físico), en el presente trabajo de grado se implementan 4 y 16 longitudes de onda, cada una transmitiendo a 2.5 Gbps con el fin de obtener 10 Gbps y 40 Gbps respectivamente a nivel de transporte .

Para el desarrollo del presente trabajo de grado y con el fin de abordar los temas requeridos del mismo, el contenido se divide en cinco capítulos:

En el capítulo 1, se presentan las características de las redes ópticas de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), las principales modulaciones y codificaciones, los formatos de modulación RZ-DPSK y NRZ-OOK, Efectos lineales y no lineales y monitoreo de desempeño óptico OPM (Optical Performance Monitoring).

En el capítulo 2, se define la metodología de simulación y escenarios de simulación que se llevarán a cabo con el fin de evaluar el impacto de los formatos de modulación estudiados sobre la ISD en la red propuesta.

En el capítulo 3, se presenta el desarrollo de los escenarios de simulación y casos de estudio planteados para cada escenario.

En el capítulo 4, se analiza el impacto de los formatos de modulación estudiados sobre la ISD en la red propuesta a nivel de transporte.

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

1. GENERALIDADES

En el capítulo 1, se describe el comportamiento de los sistemas WDM (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), se analizan algunas investigaciones previas con el fin de elegir los formatos de modulación y codificación con mayor implementación en los sistemas de fibra óptica y se define la densidad espectral de información (ISD, Information Spectral Density) a partir del teorema de Capacidad del Canal de Shannon.

1.1 SISTEMAS WDM

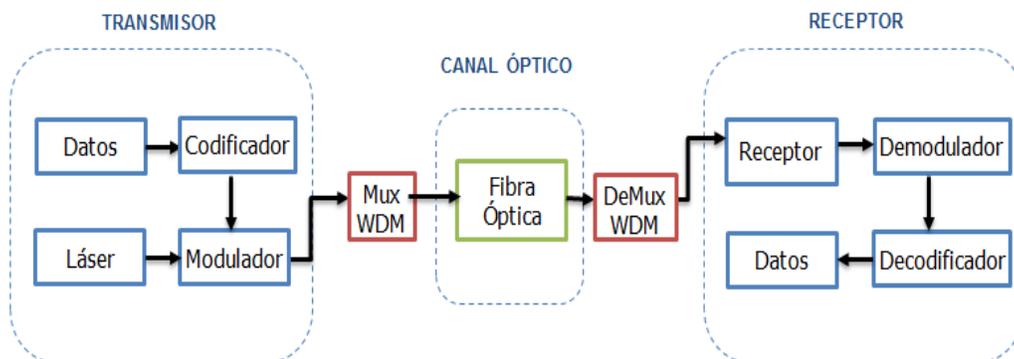
Los sistemas WDM consisten en la multicanalización por División de Longitud de Onda, esta técnica permite que por medio de una sola fibra óptica se transmitan varias longitudes de onda, cada una de estas asociadas a un canal de transmisión diferente y espaciada entre con el fin de evitar que interfieran una con otra. [1]

En la actualidad existe gran demanda de servicios de video, audio, televisión, entre otros, los cuales exigen sistemas más robustos, complejos y de alta capacidad de ancho de banda, es aquí donde los sistemas WDM toman importancia ya que se caracterizan por ser efectivos en el transporte de gran volumen de información, esto debido a la multiplexación de varias longitudes de onda sobre una misma fibra óptica.

La Figura 1, muestra el diseño de un sistema óptico de una red WDM, necesario para lograr una comunicación entre transmisor y receptor por medio de fibra óptica, este sistema consta de elementos como moduladores, codificadores, regeneradores, amplificadores, divisores de canal, decodificadores y foto receptores [2]. El sistema presenta varios tramos (span^1) de fibra óptica, donde generalmente cada tramo dependiendo de la fibra utilizada mide entre 80 Km y 120 Km. [3]

¹ Distancia de cada enlace punto a punto

Figura 1. Sistema de Comunicaciones Óptico WDM [2].



Los sistemas WDM se dividen en dos clases, WDM Densamente Espaciados (DWDM, *Dense Wavelength División Multiplexing*) y WDM Ampliamente Espaciados (CWDM, *Coarse Wavelength División Multiplexing*) para los cuales la Union Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) ha definido las recomendaciones G.694 [4] y G.694.2 [5] proporcionando respectivamente los parámetros típicos de estas redes, como se muestra en el Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros típicos en redes CWDM y DWDM [3].

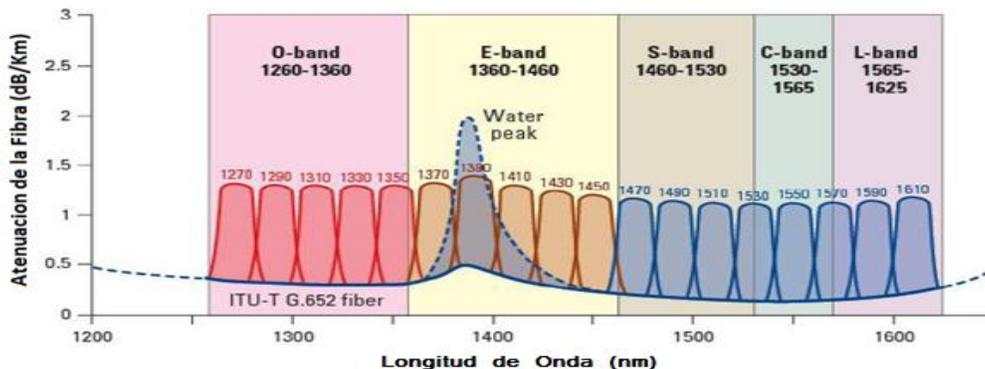
Características	CWDM	DWDM MAN/WAN	DWDM Largo Alcance
Espaciamiento de los Canales	20nm (2500GHz)	0.8nm (100GHz)	0.4nm (50GHz)
Ventanas Utilizadas	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Canales por Fibra	4 -16	32 – 80	80 – 160
Capacidad por Canal	2.5Gb/s	10Gb/s	10 - 40Gb/s
Distancias Típicas	Hasta 80Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

En las redes WDM se destacan dos topologías, una de ellas es la topología en anillo, con una velocidad de tráfico en el rango de 622 Mbps a 10 Gbps por canal además de ser una arquitectura comúnmente empleada en tramos de pocas decenas de kilómetros y en áreas metropolitanas y la topología punto a punto, que

se caracteriza por canales de alta velocidad en el rango de 10 Gbps a 40 Gbps logrando confiabilidad e integridad en la señal [6].

1.1.1 Sistemas CWDM. CWDM es una tecnología robusta de transmisión de señales a través de fibra óptica implementada para aumentar la capacidad de la fibra multimodo de las Redes de Área Local (*LAN-Local Area Network*). En la recomendación ITU-T G.694.2 se define una separación de longitudes de onda de 20 nm (o 2500 GHz) en 5 diferentes ventanas que van desde los 1271 a 1611 nm para este sistema, como se observa en la Figura 2, permitiendo transportar en una sola fibra óptica monomodo 18 longitudes de onda, con espaciamiento entre canales mayores que los utilizados en DWDM, reduciendo la capacidad y distancia de transmisión del sistema, por esta razón CWDM es generalmente implementado en redes metropolitanas de corto alcance y redes empresariales.

Figura 2. Espaciamiento de los Canales CWDM, recomendación ITU-T G.694.2 [5].



Al ser una tecnología simple CWDM permite un bajo costo en implementación, bajo requerimiento en el espaciamiento de canales, fácil configuración y manejo de la red, bajo consumo de potencia, sin embargo, presenta algunas desventajas, como menor capacidad y distancia comparada con DWDM. [7]

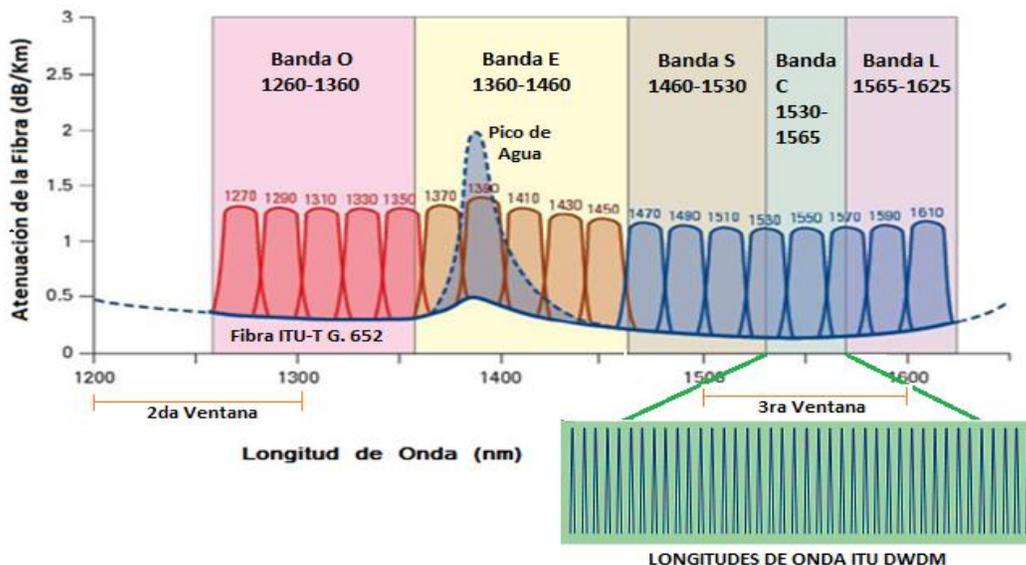
1.1.2 Sistemas DWDM. Con el fin de explotar al máximo la capacidad de transmisión en las redes de fibra óptica, se ha implementado sistemas como DWDM, ya que este brinda la posibilidad de aumentar la capacidad de información transmitida, aprovechando el ancho de banda disponible en la red óptica. En DWDM el espaciamiento entre canales es reducido debido a que su finalidad es

acoplar en una única fibra el mayor número de longitudes de onda posibles. Las principales ventajas de este sistema es que permite aprovechar al máximo el ancho de banda disponible del sistema, el bajo incremento en el costo debido a la implementación de un número considerable de nuevos y la posibilidad de trabajar sobre tendidos de fibra ya existentes logrando expandir y desarrollar sistemas ágiles y eficientes. [8] [9] [10]

Para los sistemas DWDM, en la recomendación ITU-T G.694.1 se definen los espaciamientos empleados los cuales van desde los 12,5GHz [3], permitiendo aumentar la capacidad de transporte de información ya que al disminuir el espaciamiento entre longitudes de onda se logra que muchas de ellas se multiplexen sobre una misma fibra óptica, permitiendo superar las limitaciones de CWDM sin embargo con DWDM el costo del sistema será mayor pues esta inversamente relacionado con el espaciamiento entre otros aspectos.

Las redes ópticas trabajan generalmente en tres (3) regiones del espectro definidas como ventanas de operación, los sistemas DWDM hacen uso de la tercera ventana, la cual corresponde a la banda C extendida, como se muestra en la Figura 3, esta región comprende toda la banda C y parte de la S y la L, es decir va en el rango de 1500 a 1600 nm, el estándar ITU G.694.1 recomienda esta banda para la implementación de DWDM ya que presenta menor atenuación, baja dispersión y pérdidas de inserción [11].

Figura 3. Representación de las longitudes de Onda en Sistemas DWDM [12].



Los sistemas DWDM pueden ser implementados en cualquier tipo de red, generalmente en redes de larga distancia (*Long Haul*), las cuales son utilizadas para transmitir grandes cantidades de información en distancias que van desde los 300 a los 2500 Km, operando entre los 1530 y los 1635 nm, gracias a DWDM la expansión de estas redes ha sido sencilla, permitiendo aumentar la capacidad de transporte y las velocidades de transmisión, de esta manera se logra extender la cobertura y el ancho de banda de la red [13].

Del mismo modo, la tecnología DWDM es implementada en redes de almacenamiento (*SAN, Storage Area Network*) ya que estas redes almacenan datos masivamente lo que hace necesario emplear elevados anchos de banda y en Redes de Área Metropolitana (*MAN, Metropolitan Area Network*), que trabajan en la segunda y tercera ventana de comunicaciones ópticas, es decir, entre los 1280 y los 1625 nm, estas redes cubren el área de una ciudad o varias ciudades cercanas y deben ser compatibles con las redes *SAN* y *Long Haul*.

Al implementar DWDM en una red *MAN* se obtiene escalabilidad, confiabilidad, gran ancho de banda y tamaño reducido de equipos. El desarrollo del presente trabajo de grado se realiza en un contexto de sistemas DWDM en un entorno *MAN* [8].

1.2 FORMATOS DE MODULACIÓN

La transmisión de información a través de fibra óptica requiere de un proceso de modulación, con el fin de transportar información sobre una señal portadora, cambiando el valor de uno de sus parámetros (Amplitud, Fase o Frecuencia) de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora. Este proceso permite transmitir mayor información en forma simultánea dando un mejor uso al canal de comunicación, así como también, mejora la resistencia contra posibles interferencias y ruidos en el sistema [14].

Todo formato de modulación DWDM se compone de dos elementos importantes: la modulación, entre los cuales se destacan los formatos de modulación en amplitud (*ASK, Amplitude Shift Keying*), modulación en frecuencia (*FSK, Frequency Shift Keying*), modulación por Desplazamiento de Fase (*PSK, Phase-Shift Keying*), modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (*DPSK, Differential Phase Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (*QPSK, Quadrature Phase-Shift Keying*) y Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase en Cuadratura (*DQPSK, Differential Quadrature Phase-Shift Keying*) y la codificación entre las cuales están: No Retorno a Cero (*NRZ, Non Return to Zero*), RZ Retorno a Cero (*RZ, Return to Zero*)

y Portadora Suprimida Retorno a Cero (CS-RZ, *Carrier Suppressed Return to Zero*) [2] [15].

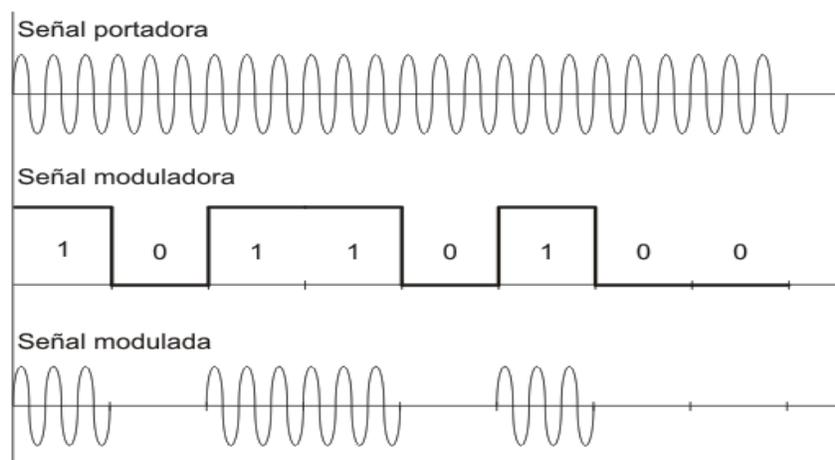
En la onda portadora es posible variar cuatro parámetros distintos, con lo que se obtiene cinco tipos de modulaciones: modulación en amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*), modulación en frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*), modulación en fase (PSK, *Phase Shift Keying*) y modulación del estado de polarización (PoLSK, *Polarization Shift Keying*) [14].

A continuación se describen algunos formatos de modulación para sistemas de comunicaciones ópticas:

1.2.1 Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK, Amplitude Shift Keying). También llamada modulación de encendido-apagado (OOK, *On-Off Keying*), la cual es un caso especial de ASK donde la amplitud de la portadora se hace cero a la salida del modulador, consiste en la manipulación o conmutación de una onda portadora sinusoidal, como consecuencia del dígito binario de entrada. En esta modulación la frecuencia y la fase permanecen constantes y la amplitud de la señal portadora varía conforme el flujo de bit, entre dos valores binarios diferentes, si existe presencia de señal portadora a amplitud constante se tiene un dígito, o al contrario, si hay ausencia de señal portadora se representa con otro dígito. [16] [17] [18].

En la figura.4 se muestra un ejemplo de una señal modulada en ASK.

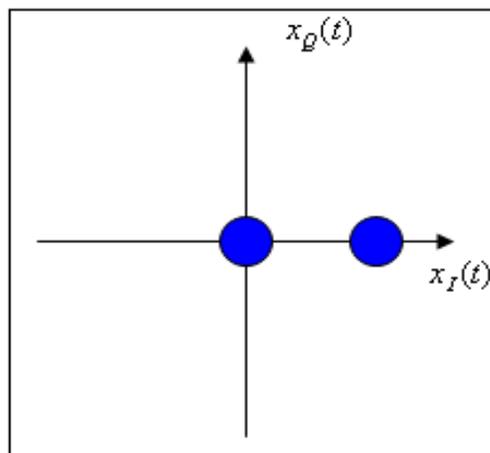
Figura 4. Modulación ASK- Amplitud vs Tiempo [15].



La modulación ASK es lineal, además es sensible al ruido atmosférico y a las distorsiones. Los procesos de modulación y demodulación en ASK son de bajo costo y esta técnica de modulación es comúnmente utilizada en sistemas de fibra óptica, para los transmisores LED un valor binario es representado por un pulso de luz y el otro valor por ausencia total de luz [15].

En la Figura 5 se muestra el diagrama de constelación de la modulación ASK.

Figura 5. Diagrama de constelación de modulación ASK [19].



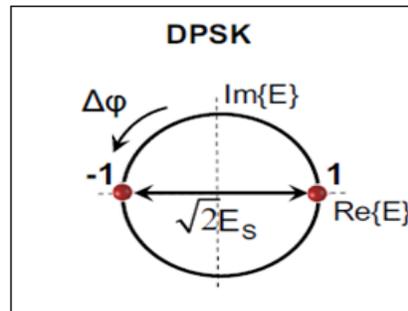
1.2.2 Modulación por desplazamiento diferencial de fase (DPSK, Differential Phase-Shift Keying). Es una técnica de modulación de señales digitales en la cual la fase de la señal a transmitir se codifica en relación a la diferencia o cambio de fase entre intervalos sucesivos o también llamada codificación diferencial, por ejemplo, si se tiene como bit un 1 lógico a la entrada del modulador, obtendremos una señal con desfase de 0° a la salida del modulador, o si al contrario se tiene un bit de entrada 0, a la salida se tendrá un desfase de 180° , como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Tabla de verdad de la modulación DPSK [20].

Entrada	Fase de Salida
0 lógico	$+180^\circ$
1 lógico	$+0^\circ$

En la Figura 6 se muestra el diagrama de constelación de la modulación DPSK, donde cada estado de modulación es codificado por un salto respecto a la fase que tenía la señal anterior. Empleando este sistema se garantizan las transiciones o cambios de fase en cada bit, lo que facilita la sincronización del reloj en recepción.

Figura 6. Diagrama de constelación de la modulación DPSK [12].



1.2.3 Modulación por desplazamiento por cuadratura diferencial de fase (DQPSK, Differential Quadrature Phase-Shift Keying). Formato de modulación multinivel, que transporta más de un bit por símbolo lo cual tiene ventajas como reducir el tiempo requerido para enviar una cantidad dada de datos a través de un ancho de banda limitado, lograr una alta eficiencia espectral, es decir, una alta tasa de bit, aunque el ancho de banda sea bajo. En DQPSK, la información de símbolos se codifica como el cambio de fase relacionada con el último estado de fase transmitido como se muestra en la figura 6. En este caso, el receptor tiene que detectar el cambio de fase anterior y no el valor absoluto de la misma, lo que evita la necesidad de una portadora sincronizada [21].

Figura 7. Transiciones de fase para modulación DQPSK [21].

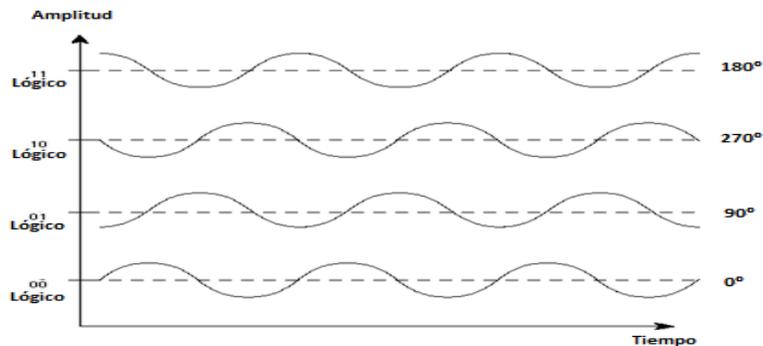


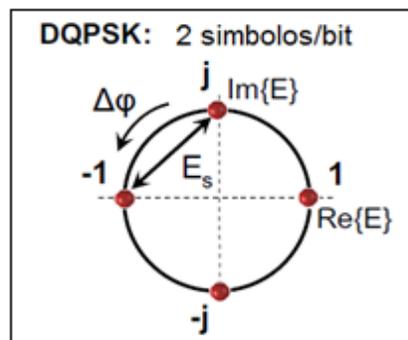
Tabla 3. Transiciones de fase para la modulación DQPSK [20].

DQPSK	
Bits de Información	Cambio de Fase
00	0°
01	+90°
10	-90° o +270°
11	+180°

La gran ventaja de esta modulación es el uso eficaz del espectro al representar más de un bit por cada elemento de señalización, sin necesidad del uso de sincronización en la portadora [22].

En la Figura 8 se muestra el diagrama de constelación de esta modulación.

Figura 8. Diagrama de constelación de la modulación DQPSK [12].

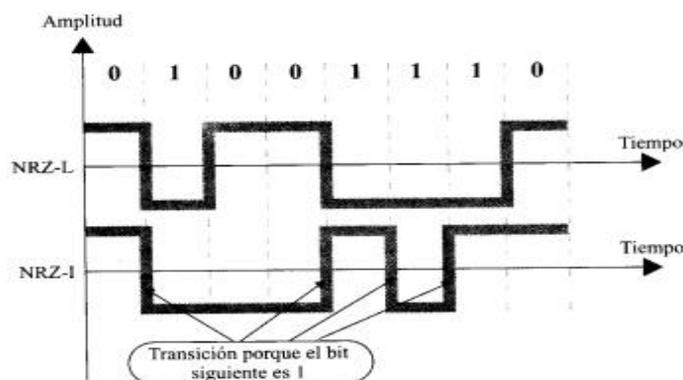


1.2.4 No retorno a cero (NRZ, No Returnto Zero). En la codificación NRZ la señal siempre toma valores positivos o negativos, es decir que no vuelve a cero entre bits consecutivos; los códigos NRZ se pueden clasificar en dos, No retorno a Nivel Cero (NRZ-L, *No Returnto Zero Level*) y No Retorno a Cero Invertido (NRZ-I, *No returnto Zero Invertido*) [22].

- No Retorno a Nivel Cero (NRZ-L, *No Return to Zero Level*). La señal depende de cómo sean configurados los niveles de voltaje, típicamente el nivel positivo representa el “1” lógico y el nivel negativo representa el “0” lógico, aunque también pueden ser configurados de manera contraria, lo que implica que la señal depende del estado de cada bit. El problema que presenta este tipo de codificación es que al recibir un flujo continuo de ceros o de unos según la configuración, el receptor percibe un voltaje continuo por lo que deberá sincronizar su reloj con el emisor para de esta manera conocer cuántos bits está recibiendo por medio de dicho flujo [22].
- No Retorno a Cero Invertido (NRZ-I, *No return to Zero Invertido*). En este tipo de codificación la señal se invierte su nivel de voltaje cada vez que el bit entrante sea un “1” lógico, mientras que al entrar un “0” la señal mantiene su nivel sin presentar ningún cambio, lo que implica los niveles de voltaje no significan nada por sí mismos, el receptor tiene en cuenta los cambios de nivel para saber cuándo ha llegado un “1” [22].

La Figura 9 muestra la representación de la codificación NRZ-L y NRZ-I con una serie de bits iguales para ambos casos, en la cual se ha configurado el nivel positivo para “0” y el nivel negativo para “1” [22].

Figura 9. Representación codificación NRZ-L y NRZ-I [22].

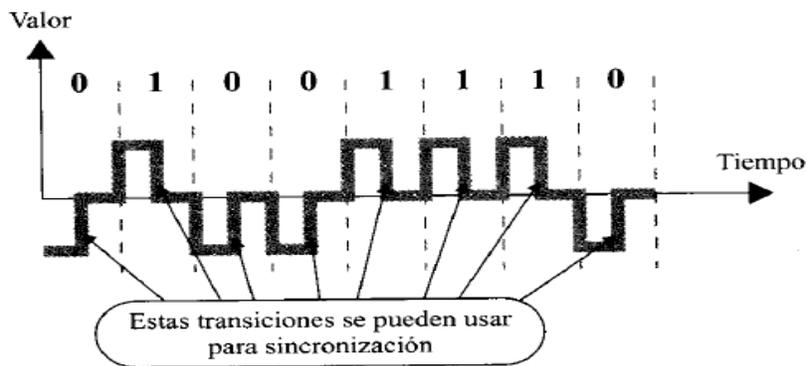


1.2.5 Retorno a cero (RZ, Return to Zero). Como se mencionó anteriormente, siempre que se encuentren flujos continuos de “1” o “0” se pueden presentar pérdidas de información en el receptor debido a que es necesario que exista sincronismo entre este y el emisor, una solución a este problema sería enviar una señal de temporización por un canal distinto lo cual sería costoso y podría presentar errores; por lo tanto se hace necesario garantizar la sincronización por

medio de un cambio de nivel de la señal por cada bit, para que esto sea posible es necesario tener más de dos niveles de cambio, en esta codificación se trabaja con tres niveles, positivo, negativo y cero, haciendo que en la mitad del camino de cada bit, la señal retorne a cero. Esta codificación al ser bipolar, necesita mayor ancho de banda que las codificaciones anteriores para realizar los cambios en la señal al codificar cada bit [22].

La Figura 10 representa las transiciones de una señal con codificación RZ, en la cual se ha configurado su valor positivo para representar los "1" lógicos y su valor negativo para representar los "0" lógicos [22].

Figura 10. Representación codificación RZ [22].



En los sistemas ópticos existen varios formatos de modulación que están en investigación, por esto, intentar abarcar todos ellos estaría fuera del alcance de este trabajo de grado. Es por esto que en el presente trabajo de grado, se selecciona el formato de modulación más implementado en redes ópticas a nivel internacional y nacional, así como también, el que mejor desempeño presenta con respecto a los efectos lineales y no lineales, dependencia de potencia, eficiencia espectral y configuración de equipos. Para la elección de los formatos de modulación con los cuales se desarrollara el presente trabajo de grado, se tuvieron en cuenta las siguientes referencias sobre investigaciones realizadas entre otras:

- Comparison between NRZ and RZ OOK Modulation Format in Chromatic Dispersion compensation in Both Electrical and Optical Compensator [23] se compara y evalúa la eficiencia de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-

OOK en la compensación de dispersión cromática en un sistema óptico donde se observa que RZ-OOK presenta los mejores resultados, además, se varía la distancia de transmisión de los dos sistemas para evaluar la tasa de compensación de bit (BER) con respecto a las técnicas de modulación mencionadas.

- Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System [24] se estudian y comparan los formatos de modulación NRZ-OOK, RZ-OOK, CSRZ, NRZ-DPSK y RZ-DPSK para velocidades de 10 Gb/s y 40 Gbps en sistemas WDM, además, se evalúan los efectos lineales y no lineales que se derivan del sistema óptico. Al concluir el trabajo se determina que RZ-DPSK es la mejor opción de los formatos de modulación investigados.
- Advanced Optical Modulation Formats [25] se detallan y analizan los formatos de modulación más utilizados para la transmisión de datos, también se incluye una amplia información teórica, principalmente de los formatos de modulación RZ-DPSK y RZ-DQPSK los cuales permiten un mejor desempeño del sistema, gracias a la mejora que presentan en la sensibilidad del receptor frente a otros formatos de intensidad.
- Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System [26] se estudia experimentalmente el rendimiento de RZ-DPSK en un sistema WDM y la comparación con OOK en un sistema de 10Gbps. Se concluye que la modulación RZ-DPSK es ventajosa en un sistema de alta eficiencia trabajando a esta velocidad.

De las investigaciones anteriormente mencionadas, se puede concluir que el formato de modulación más implementado en comunicaciones ópticas sobre redes DWDM es el NRZ-OOK, y que el formato que presenta mejores resultados frente a las degradaciones ópticas, eficiencia espectral y características de dispositivos es el RZ-DPSK para velocidades que van desde 2.5 Gbps a 40 Gbps. A continuación se describirán sus principales características para posteriormente ser desarrollados a nivel de simulación en el presente trabajo de grado.

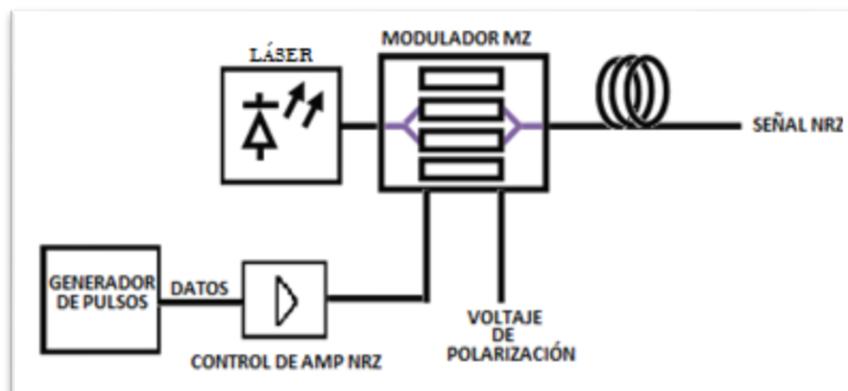
1.3 FORMATOS DE MODULACION CON MAYOR IMPLEMENTACION DENTRO DE LAS REDES DWDM

1.3.1 NRZ-OOK. En los sistemas de comunicaciones ópticas el formato de modulación No Retorno a Cero- Encendido Apagado (NRZ-OOK, *Non Return to Zero-On Off Keying*) históricamente ha sido el más implementado, ya que sus transmisores y receptores requieren de un bajo ancho de banda eléctrico y están configurados de una manera simple, además de no ser sensible al Ruido de Fase del Laser (FWHM, *Full Width at Half Maximum*) [24].

En los últimos años, conforme las comunicaciones ópticas han avanzado hacia regímenes binarios superiores y se tienen sistemas DWDM con enlaces a mayor distancia, el formato NRZ-OOK ha perdido terreno frente a otros formatos más adecuados para enlaces de elevada capacidad. Sin embargo, debido a su dominio histórico, es una buena referencia a modo comparativo [15].

En la Figura 11, se observa el diagrama de bloques de un transmisor NRZ, donde la señal eléctrica es modulada por medio de un modulador de intensidad externo, dichos moduladores pueden ser del tipo Mach-Zehnder (MZM, *Mach Zehnder Modulator*) o de Electro-Absorción (EAM, *Electro Absorption Modulator*), que convierte una señal eléctrica OOK con velocidad de datos de R_b en una señal óptica OOK a la misma velocidad de datos. El ancho de pulso óptico de cada dígito " 1 " es igual a la inversa de la velocidad de datos. Para detectar una señal óptica NRZ, se utiliza en el receptor un simple fotodiodo, que convierte la potencia óptica de la señal en corriente eléctrica, esto se llama detección directa (DD) [24].

Figura 11. Diagrama de bloques transmisor NRZ-OOK [24].

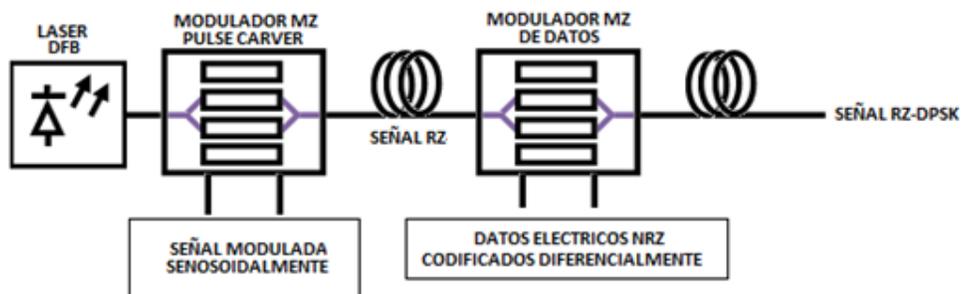


1.3.2 RZ-DPSK. La modulación por desplazamiento diferencial de fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*) se puede implementar a través de formatos como NRZ-OOK y RZ-OOK, estos permiten duplicar la capacidad de transmisión sin incurrir en una penalización de potencia por efecto de la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) y la Dispersión por Modo de Polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) [27].

En DPSK la información está contenida en el valor del salto de fase con relación al anterior, está es una ventaja con respecto a otros formatos de modulación ya que puede ser implementado en sistemas en los cuales no se conoce la fase [28]. Otra ventaja de esta modulación proporcionar una mejora de 3 dB en la sensibilidad del receptor al requerir una baja OSNR, además de ser más tolerante a los efectos no lineales en sistemas DWDM [12].

En la Figura 12 se muestra un diagrama de bloques típico de un transmisor RZ-DPSK, primero se observa un modulador de fase electro-óptico que genera una señal convencional NRZ-DPSK la cual es modulada a la misma velocidad de datos por un pulso tipo carver, por medio de otro modulador de intensidad electro-optico. Se debe utilizar más de un modulador para generar una señal óptica RZ-DPSK [29].

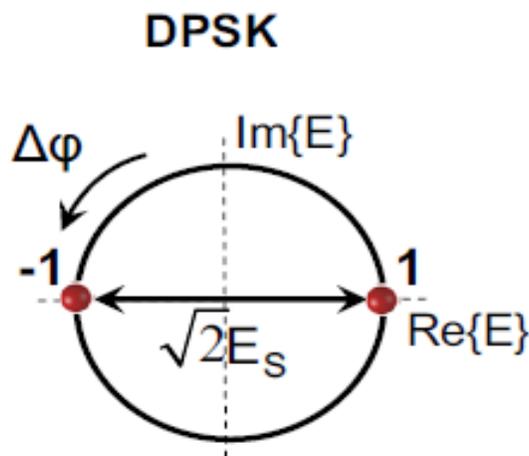
Figura 12. Diagrama de bloques transmisor RZ-DPSK [24].



En el trayecto óptico del receptor es insertado un Interferómetro de Retraso (DI, *Delay Interferometer*) para convertir una modulación de fase diferencial en una modulación de intensidad, esta modificación en el receptor es necesaria puesto que de lo contrario, el receptor RZ-DPSK no puede detectar directamente la señal [12].

La Figura 13 muestra el diagrama de constelaciones para una modulación binaria DPSK, en la cual se observa que la señal de energía E_s es la diferencia entre dos puntos de la constelación. En DPSK los dos puntos de la constelación tienen igual señal de energía con una fase diferencial de $\Delta\phi=0$ ó $\Delta\phi=\pi$. Si la diferencia entre ambos puntos de la constelación es $\sqrt{2E_s}$ la potencia promedio es la misma que para OOK.

Figura 13. Diagrama de constelaciones modulación binaria DPSK [27].



1.4 DENSIDAD ESPECTRAL DE INFORMACIÓN

1.4.1 Teorema de Shannon y Hartley de la capacidad del canal. Uno de los bloques fundamentales de un sistema de fibra óptica es el canal de comunicación, el cual es el medio físico necesario para que los bits viajen del transmisor al receptor. El canal de comunicación introduce distorsiones lineales y no lineales además de ruido a la información transmitida [30]. En un canal de comunicación se busca obtener la tasa máxima a la que se puede transferir información con una pequeña probabilidad de error, con el fin de mantener la integridad de los datos transmitidos, es aquí donde el teorema de Shannon de la capacidad del canal cobra importancia [30].

El segundo teorema de Shannon-Hartley define una cota superior que establece la máxima cantidad de información que puede ser transmitida sin error sobre dicho enlace de comunicaciones con un ancho de banda específico y que está sometido

a la presencia de la interferencia del ruido. Así, si el nivel de la señal S/N es menor, es decir, cuando la capacidad de la señal es más cercana al ruido, la capacidad del canal disminuirá [31].

Para un nivel de ruido dado podría parecer que la velocidad de transmisión se puede aumentar incrementando tanto la energía de la señal como el ancho de banda, sin embargo, al aumentar la energía de la señal también lo hacen las no linealidades del sistema dando lugar a un aumento en el ruido de intermodulación. Ya que el ruido se ha supuesto blanco, cuanto mayor sea el ancho de banda más ruido se introducirá al sistema. Por lo tanto cuando se aumenta B disminuye la SNR [32].

La ecuación (1.1), proporciona la tasa máxima de bits alcanzable ($C_{bit/s}$) dado el ancho de banda del canal, la restricción de potencia de la señal y el ruido aditivo logra transmitir la información con una BER arbitrariamente pequeña [31].

$$C_{bit/s} = B \log_2 \left(\frac{P}{N} \right); \quad (1.1)$$

Donde

C : Capacidad del canal (tasa de bits de información bps).

B : Ancho de banda del canal (Hertz).

P : Potencia de la señal útil (puede ser expresada en vatios, milivatios).

N : Potencia de ruido del canal (puede ser expresada en milivatios, microvatios).

Al dividir ambos lados de la ecuación (1.1) entre B, se obtiene otra definición de la capacidad del canal (2), que ahora tiene la unidad dimensional de $(\frac{bits}{s})/Hz$ [31].

$$\frac{C_{bit/s}}{Hz} = \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right); \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) proporciona la tasa de bits máxima alcanzable por unidad de ancho de banda. Esta ecuación representa la ISD en un sistema de comunicaciones, generalmente conocida como eficiencia espectral, lo cual es

correcto si se hace referencia sobre una única longitud de onda en el canal, es decir, $\lambda = 1$. sin embargo, para un sistema DWDM se define la ISD como la tasa de bits máxima alcanzable con n longitudes de onda que se pueden implementar en un mismo canal ($\lambda=2,3,\dots, n$).

Para encontrar una relación entre la densidad espectral de información y la SNR es necesario recurrir a la potencia media de la señal P , a la energía media por bit E_s y a un canal de comunicación con una capacidad por unidad de tiempo de $C_{bit/s}$ y un ancho de banda de la señal B [31], los cuales están relacionadas a través de la ecuación (1.6):

$$P = E_s C_{bit/s}; \quad (1.6)$$

La potencia de ruido N y la energía media de ruido por bit E_s , están relacionadas a través de (1.7):

$$N = E_s B_{Hz}; \quad (1.7)$$

Por lo tanto, la SNR se puede expresar también de la forma:

$$SNR = \frac{P}{N} = \frac{E_s C_{bit/s}}{E_s B}; \quad (1.8)$$

La ecuación (1.8) se refiere explícitamente al bit SNR para el ancho de banda B . Reemplazando el resultado anterior en la ecuación (1.2), se tiene la ecuación (1.9):

$$C_{bit/s} = B \log_2 \left(1 + \frac{E_s C_{bit/s}}{E_s B} \right); \quad (1.9)$$

Entonces

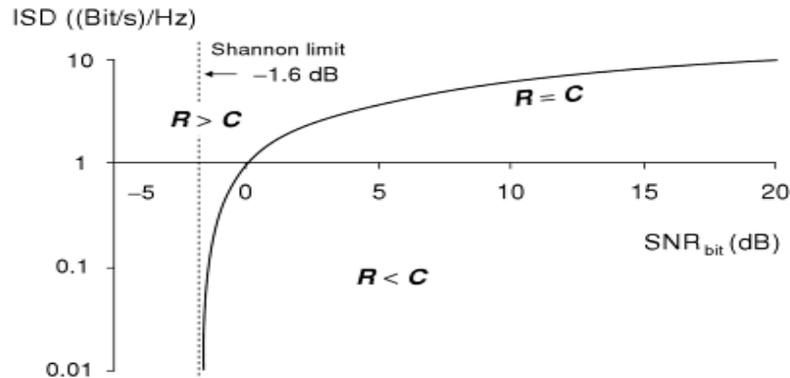
$$C_{bit/s} = \log_2 \left(1 + \frac{E_s}{E_s} C_{(bit/s)/Hz} \right); \quad (1.10)$$

Teniendo en cuenta la relación $SNR_{bit} = E_s/E_n$ y sacando exponente base dos a ambos lados de la ecuación (1.10), se define la SNR en la ecuación:

$$SNR_{bit} = \frac{2^{C_{(bit/s)/Hz}} - 1}{C_{(bit/s)/Hz}}; \quad (1.11)$$

La ecuación (1.11), proporciona una relación explícita y general entre la SNR y el canal ISD, la cual se puede observar en la Figura 14.

Figura 14. Diagrama Densidad Espectral de Información vs Relación Señal a Ruido [31].



En la Figura 14, se observan dos regiones, $R < C$ y $R > C$, donde R corresponde a la velocidad de bits y C a la capacidad del canal, separadas por la curva del límite de capacidad ($R=C$). También se observa el límite de Shannon correspondiente a -1.6 dB [31].

En la región $R < C$, se puede lograr transmisión de información con una BER arbitrariamente pequeña al elegir un formato de modulación adecuado, que conduce a una transmisión libre de errores [31].

En la región $R > C$, no existe un formato de modulación que permita realizar una transmisión con un nivel de BER aceptable. Lo anterior no implica que no sea posible transmitir información [31].

También se observa como la ISD se desvanece rápidamente hasta convertirse en cero cuando la SNR se aproxima asintóticamente al límite de Shannon (-1.6 dB). Por lo tanto, cuanto más se aproxima la SNR al límite de Shannon, menor es la ISD y más pequeño el número de bits que se pueden transmitir. La condición limitante $SNR_{(bit)} = -1.6 \text{ dB}$ corresponde a un canal inútil con una ISD de 0 (bits/s)/Hz [31].

Para optimizar la transmisión de acuerdo a la figura 14, se pueden plantear dos estrategias:

Con una ISD fija, mediante el aumento de la SNR para reducir la BER.

Con la SNR fija, mediante la disminución de la ISD para mejorar la tasa de bits.

Finalmente el presente trabajo de grado, se caracterizan los formatos de modulación que han generado mayor atención dentro de los estudios del contexto internacional, identificando² que el formato de modulación NRZ-OOK es el más implementado debido a su simplicidad y RZ-DPSK podría presentar mayor desempeño frente a los efectos lineales y no lineales, para permitir la transmisión en redes con velocidades del orden de los 10Gb/s y 40Gb/s.

Así mismo, se analiza la relación entre el formato de modulación y la ISD además de la incidencia de la BER y la OSNR en la red propuesta.

² Dicha identificación de los Formatos de Modulación, se realiza en base al estado del arte del contexto internacional.

2. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En el presente capítulo se analizan los factores que inciden en la ISD, los parámetros de monitoreo óptico y la metodología de simulación implementada, con lo cual se procede a realizar el planteamiento y definición de los escenarios de simulación así como también determinar el impacto de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK sobre la ISD en la red propuesta.

2.1 EFECTOS LINEALES Y NO LINEALES EN SISTEMAS OPTICOS

2.1.1 Análisis de los efectos lineales

- Ruido y Pérdidas: Debido a algunas deficiencias como lo son la dispersión Rayleigh y la absorción de los materiales, la señal transmitida sobre un tramo de fibra experimenta disminución en su potencia, este fenómeno es denominado pérdidas de la fibra y se representa en la ecuación 2.1.

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (2.1)$$

En la ecuación anterior α es la constante de atenuación, P_0 es la potencia de la señal óptica en la entrada de la fibra, L es la longitud de la fibra y P_T es la potencia transmitida. [24]

Para el análisis de la ISD, este tipo de degradación puede presentarse y afectar el sistema ya que depende de la distancia de la fibra y de los dispositivos que conforman la red.

Por las características de los formatos de modulación que se implementan en este trabajo de grado, se espera que en la modulación NRZ-OOK el efecto del ruido y las pérdidas introducidas por los elementos que constituyen el enlace contribuyan considerablemente a la degradación de la red propuesta, mientras que en la modulación RZ-DPSK se espera que las pérdidas y el ruido no afecten el desempeño del sistema.

- **Dispersión Cromática.** La dispersión cromática es una consecuencia de las propiedades físicas del medio de transmisión y consiste en el ensanchamiento del pulso según la longitud de onda y la PMD teniendo como resultado Interferencia entre símbolos (ISI, *Intersymbol Interference*). Esta degradación de la señal limita la calidad de la transmisión y un gran ensanchamiento produciría errores en la codificación y superposición de los pulsos. [33] [34]

La sensibilidad a la CD se incrementa linealmente con la distancia y cuadráticamente con la velocidad. Para la red planteada en este trabajo de grado se espera que la CD genere mayores limitaciones al trabajar con velocidades de 40Gbps, en comparación con una red que transmite a 10 Gbps, la cual tiene 16 veces más tolerancia a la CD que una que trabaja a 40Gbps. [33] [34]

- **Dispersión por Modo de Polarización:** Esta degradación lineal es el resultado de la diferencia de velocidades de grupo de los modos de polarización, este cambio de velocidad produce birrefringencia, resultando una división de la señal transmitida en dos ondas que viajan a distintas velocidades. La PMD se determina a partir del retardo diferencial de grupo, provocado por el ensanchamiento y distorsión de los pulsos. Este efecto es considerable para velocidades de transmisión igual o superiores a 10Gbps. [35]

Debido a las velocidades con las que trabaja la red propuesta, se espera que se produzca interferencia intersimbólica y por lo tanto un aumento de la tasa de bit erróneo, lo anterior como consecuencia de los ensanchamientos aleatorios de los pulsos ópticos producidos por la PMD. [35]

2.1.2 Análisis de los efectos no lineales. Estas degradaciones dependen de la relación entre los cambios del índice de refracción y la intensidad óptica. Son los efectos que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado, estos son: Automodulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), Mezcla de Cuarta Onda (FWM, *Four Wave Mixing*), y también los efectos de dispersión en la fibra: Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*), Dispersión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*). [36]

Los efectos no lineales ocurren debido a cambios en el índice de refracción del medio con referencia a la intensidad óptica y a los fenómenos de dispersión.

Dichos efectos no lineales son de gran importancia en sistemas basados en fibra óptica.

- Auto Modulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*): Este efecto no lineal consiste en la variación de fase auto inducida en el cual el pulso transmitido experimenta un chirp de frecuencia pues el mismo se auto modula en fase lo cual causa un ensanchamiento y degradación de los pulsos transmitidos dependiendo de la intensidad con la que se transmita la señal, siendo SPM más común en sistemas de alta potencia de transmisión. Una ventaja de este efecto es que el chirp puede compensar la dispersión cromática ya que posee signo opuesto a esta. [37]

Debido a las altas tasas de transmisión empleadas en el presente trabajo de grado se debe considerar el efecto de SPM ya que este afecta directamente la dispersión cromática. [38] [33] [36] [39]

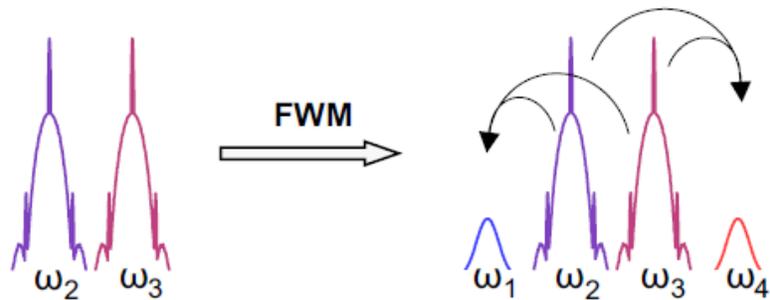
- Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*): La modulación de fase cruzada se presenta cuando dos o más canales ópticos son transmitidos al mismo tiempo por la fibra, de tal manera que la potencia de un canal puede afectar la fase de otro canal lo que ocasiona el ensanchamiento de pulsos cruzados. [40] [41]

En redes ópticas con velocidades iguales o superiores a 10 Gbps con espaciamentos estrechos (25 GHz) predominan los efectos producidos por la XPM. Para sistemas WDM con más de 10 canales es fundamental analizar este efecto. [42]

- Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*): Este efecto no lineal se presenta cuando dos o más longitudes de onda se propagan simultáneamente sobre una misma fibra lo cual puede generar una mezcla de señales y por ende nuevos componentes de interferencia en la señal óptica dependiendo del índice de refracción de la fibra y su relación con la potencia de la señal. [33]

Las componentes FWM aumentan con el número de señales que se propagan a través de la fibra y pueden interferir con la señal original y también con canales WDM adyacentes como se muestra en la Figura 15. Este efecto depende de la dispersión, de la potencia de la señal y del espaciamiento de los canales.

Figura 15. Generación de frecuencias adicionales debido a FWM [27].



Los efectos lineales y no lineales descritos anteriormente son los que se tendrán en cuenta para el análisis del sistema en la red propuesta. A continuación, se analizará la herramienta de simulación empleada así como también los parámetros de monitoreo utilizados en el presente trabajo de grado.

2.2 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Actualmente en el mercado existen diversas herramientas de simulación que permiten analizar el comportamiento de los sistemas de transmisión óptica. El Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca cuenta con la licencia de la herramienta de simulación OptSim® de Sinopsys, la cual será utilizada en el presente trabajo de grado.

Este entorno de simulación permite el diseño y la evaluación del desempeño del sistema de comunicaciones ópticas mediante una interfaz gráfica de medición flexible que facilita la visualización, el análisis y el procesamiento de los datos.

OptSim® de Sinopsys, define dos modos de simulación los cuales pueden ser utilizados según los resultados que se requieran:

- Simulación Modo Muestra: donde un componente pasará una nueva muestra de datos a otro en cada paso de tiempo de la simulación, lo cual permite que la señal de datos pase entre componentes y represente una muestra única en cada instante de tiempo. Este modo de simulación presenta dos técnicas diferentes, una técnica llamada propagación espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*) ya que trabaja en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia teniendo en cuenta el ruido y las pérdidas de los componentes y otra técnica llamada técnica de Ancho de Banda Variable de Simulación (VBS, *Variable Bandwidth*

Simulation) la cual se define en el dominio del tiempo , donde las señales son propagadas a través de las redes como muestras en el dominio del tiempo, esta técnica es utilizada para simular tanto los efectos lineales y no lineales para las componentes ópticas y eléctricas [43].

- Simulación Modo Bloque: en la cual la secuencia de entrada se analiza en bloque hasta la salida [43].

Teniendo en cuenta las características anteriores, para el desarrollo de este trabajo de grado se utilizara el modo muestra, con la técnica VBS, ya que permitirá obtener los resultados de los diferentes parámetros a estudiar de una manera fiable.

2.3 MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO (OPM, *Optical Performance Monitoring*)

Una herramienta comúnmente usada en los sistemas de comunicaciones ópticas debido a su precisa documentación y la facilidad para administrar pruebas es OPM, ya que introduce importantes mejoras en la calidad de los servicios brindados [3] [44] [45].

OPM se encarga del monitoreo a nivel físico de la calidad de la señal permitiendo la gestión y control de la red de forma confiable y reduciendo los errores de los sistemas DWDM además de brindar información con respecto a la calidad de la señal óptica [3].

OPM se divide en tres parámetros ópticos principales, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Parámetros Ópticos.



Las redes de fibra óptica WDM, cuentan con una serie de parámetros los cuales brindan información sobre el desempeño del sistema, los más importantes para el presente trabajo de grado son la BER, el factor Q, la OSNR entre otros. Estos parámetros se encuentran definidos en el estándar ITU-T G.697 [46].

2.3.1 Parámetros de desempeño óptico

- Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*): En comunicaciones ópticas, la BER representa el número de bits que se han transmitido de manera errónea por esto es uno de los parámetros más importantes, el valor típico según la ITU-T para redes WDM se encuentra alrededor de 10^{-12} es decir, por cada billón de bits transmitidos, se tiene únicamente un bit erróneo. [47] [48]

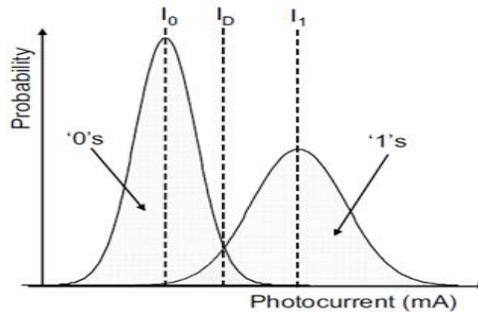
- Factor Q: Según la ITU-T O.201 este parámetro se define como la relación señal/ruido eléctrica (ESNR) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor, esta muestra los deterioros ocasionados por los defectos ópticos y eléctricos en un punto examinado de la red, este parámetro es útil cuando no se puede efectuar una medición del BER, para obtener una evaluación de la calidad esperada en el funcionamiento del sistema. [49]

El factor Q está dado por los niveles lógicos μ_0 y μ_1 , y por la distribución del ruido Gaussiano en torno a los niveles "1" y "0", definidos por las desviaciones típicas σ_0 y σ_1 , como se observa en las ecuaciones 2.2 y 2.3 y en la figura 2.3. [49] [12]

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (2.2)$$

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad (2.3)$$

Figura 17. Definición del umbral óptico de decisión [2].



- Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR, *Optical Signal – To - Noise Ratio*): Definida como la medida de la relación de la potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico. La importancia de este parámetro radica en que muestra la degradación que sufre la señal óptica por las atenuaciones presentes a lo largo de la red. [50]

La OSNR (en dB) se puede calcular haciendo uso de la ecuación 2.4. [50]

$$OSNR = 10\log \frac{P_i}{N_i} + 10\log \frac{B_m}{B_r} \quad (2.4)$$

Donde:

P_i es la potencia óptica de la señal.

B_m es el ancho de banda.

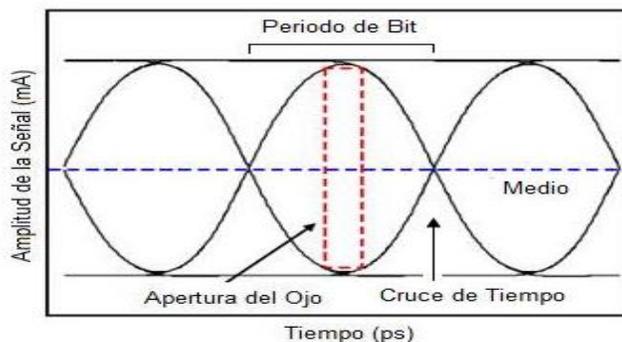
N_i es el valor promedio de la potencia de ruido medido en el ancho de banda B_m

B_r es el ancho de banda óptico de referencia típicamente seleccionado para 0.1nm.

- Diagrama del Ojo: El diagrama del ojo representa las múltiples superposiciones de unos y ceros en una determinada cantidad de bits, con el fin de obtener las características de los pulsos propagados. Es usado para el análisis de formas de onda en comunicaciones digitales por medio de dos tipos de cruces, de tiempo que corresponde a la apertura y cierre del ojo y el de amplitud el cual se refiere al nivel de voltaje en la apertura y cierre del ojo definiéndose en el periodo de bit, en este se pueden deducir la BER, el factor Q, entre otros parámetros que determinan la calidad de la señal. [51]

En la Figura 18, se observa que el eje Y corresponde al nivel de amplitud de la señal, que involucra el desempeño del sistema con efectos como la atenuación, la ISI y el margen de ruido, dependiendo de su apertura y en el eje X o eje de tiempo se tiene la incidencia del sincronismo, del jitter y las distintas regiones específicas o máscaras del diagrama del ojo, en donde cualquier señal que se propague hace referencia a problemas y errores en la transmisión. [33]

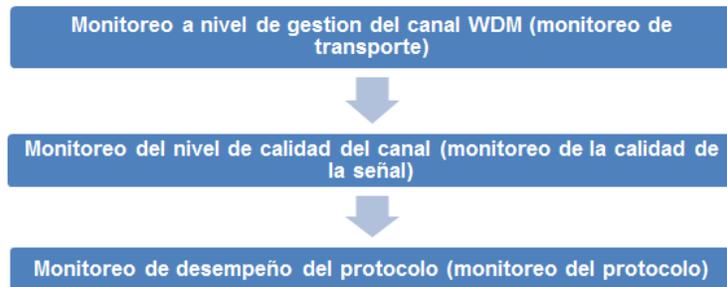
Figura 18. Parámetros del Diagrama del Ojo [5].



2.3.2 Parámetros de monitoreo óptico. Para realizar el análisis de las redes WDM es necesario tener en cuenta los parámetros de monitoreo ópticos los cuales están directamente relacionados con los parámetros de desempeño ya que brindan información para realizar la medición de estos. Algunos de los parámetros que se tendrán en cuenta en este trabajo de grado son: las potencias de ruido, atenuaciones, ancho de banda, velocidad de transmisión, entre otros.

2.3.3 Técnicas de monitoreo óptico. OPM hace referencia al monitoreo a nivel físico de la calidad de la señal para lograr un adecuado funcionamiento de la onda en el dominio óptico [44], ya que proporciona una serie de técnicas de medida con las que se puede analizar el comportamiento del sistema y determinar el impacto de los efectos no lineales a medida que se realizan variaciones en los parámetros de transmisión. El modelo de referencia OPM, consta de tres niveles como se observa en la figura siguiente.

Figura 19. Niveles del modelo de referencia OPM [44].



- **Monitoreo a nivel de gestión del canal WDM:** Hace referencia al monitoreo del canal óptico (OCM, *Optical Channel Monitoring*), en el cual se seleccionan las características del dominio óptico necesarias para el transporte y gestión del canal a nivel de la capa WDM. En este nivel se utilizan medidas como: registro de longitud de onda, medidas en tiempo real de la presencia del canal, niveles de potencia y la OSNR espectral. [44]
- **Monitoreo del nivel de calidad del canal:** Se ejecuta sobre una longitud de onda específica donde se realizan medidas sensitivas de transición de señal. En este nivel se pueden evaluar distintas características como: Estadísticas del Diagrama del ojo, además de la distorsión que ocurre en este debido a la dispersión y a los efectos no lineales, la ESNR, Factor Q [44].
- **Monitoreo de desempeño del protocolo:** Comprende el monitoreo de la información del protocolo de datos y el monitoreo de desempeño del protocolo (PPM) [44].

En el presente trabajo de grado se tendrá en cuenta los niveles de monitoreo de transporte y de la calidad de la señal ya que incluyen medidas y características como niveles de potencia, OSNR espectral [52], Factor Q [53], Diagrama del ojo [54], entre otras. El nivel de monitoreo del protocolo no se incluirá ya que no se involucra información o impacto de estos en el desempeño de una red WDM.

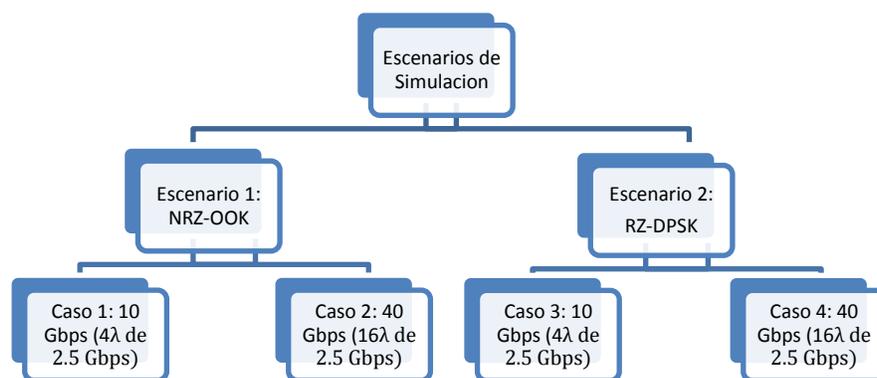
2.4 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para realizar el análisis del impacto de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK sobre la ISD en una red DWDM, se realiza un ajuste a una metodología de simulación [55], la cual consta de una serie de pasos, que permitan el cumplimiento de los objetivos propuestos en este trabajo de grado. Estos son:

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

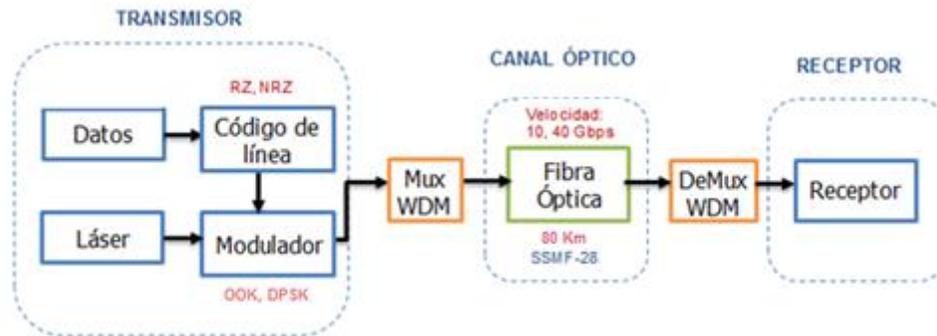
2.4.1 Escenarios de simulación y casos de estudio. Para realizar el análisis del impacto de los formatos de modulación sobre la ISD en una red DWDM, en la figura 20, se propone los siguientes escenarios de simulación con sus respectivos casos de estudio, en los cuales se analiza, como las variaciones de velocidad a nivel de transporte, espaciamiento de los canales y efectos lineales y no lineales afectan el comportamiento de la ISD.

Figura 20. Escenarios y Casos de Estudio.



- Escenario de Simulación: Con el fin de analizar el impacto de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK sobre la ISD en una red DWDM, se definen dos escenarios de simulación configurados con topología punto a punto en un enlace de 80 Km, el cual se compone de tres elementos generales: transmisor, medio de transmisión y receptor como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Esquema Escenarios de Simulación.



De los escenarios de simulación planteados se pueden obtener seis casos de estudio particulares, en los cuales se varían la cantidad de canales implementados con el fin de alcanzar las velocidades propuestas en este trabajo de grado. En la Tabla 4. Se determinan los parámetros fijos y variables del sistema, teniendo en cuenta el análisis teórico realizado en el capítulo anterior.

Tabla 4. Parámetros variables y fijos del sistema.

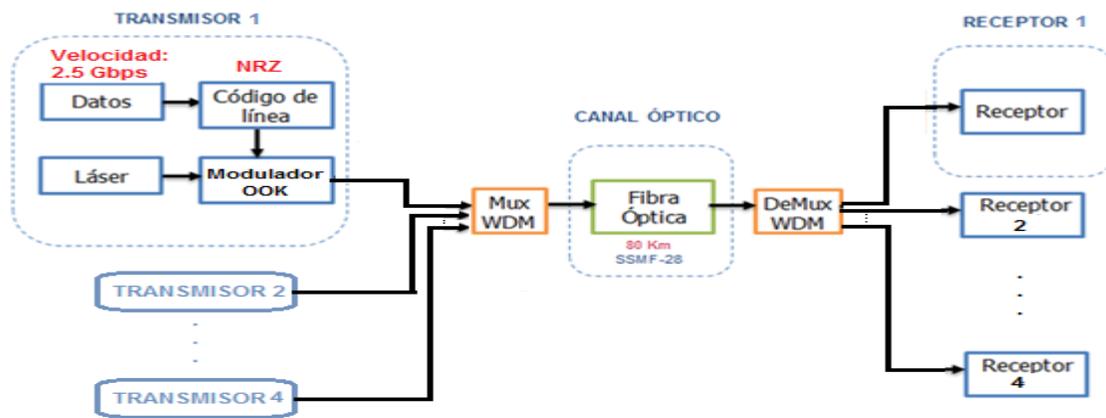
	Parámetros Variables	Parámetros Fijos
Transmisor y Receptor	Formato de Modulación Número de Canales Velocidad a nivel de transporte	Potencia
Canal		Longitud de la Fibra Tipo de Fibra

A continuación se definen las características de los escenarios de simulación y los casos de estudio que serán implementados mediante la herramienta de simulación OptSim, para su posterior análisis.

Escenario 1: este escenario está configurado para el formato de modulación NRZ-OOK y consta de los siguientes casos de estudio:

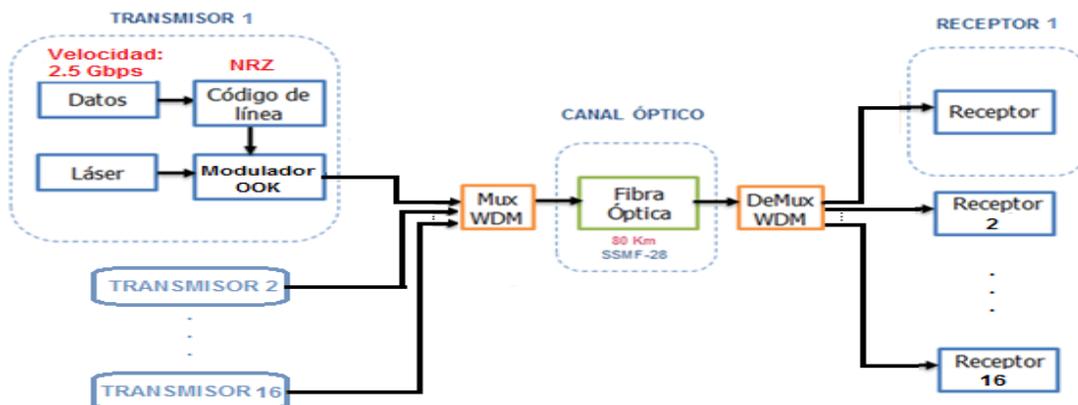
- Caso de estudio 1: Tasa de Transmisión: 2.5 Gbps.
Espaciamiento: 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz.
Canales: 4 (2.5 Gbps por lambda).
Velocidad a Nivel de Transporte: 10 Gbps

Figura 22. Caso de estudio 1.



- Caso de estudio 2: Tasa de Transmisión: 2.5 Gbps.
Espaciamiento: 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz.
Número de Canales: 16(2.5Gbps por lambda).
Velocidad a Nivel de Transporte: 40 Gbps

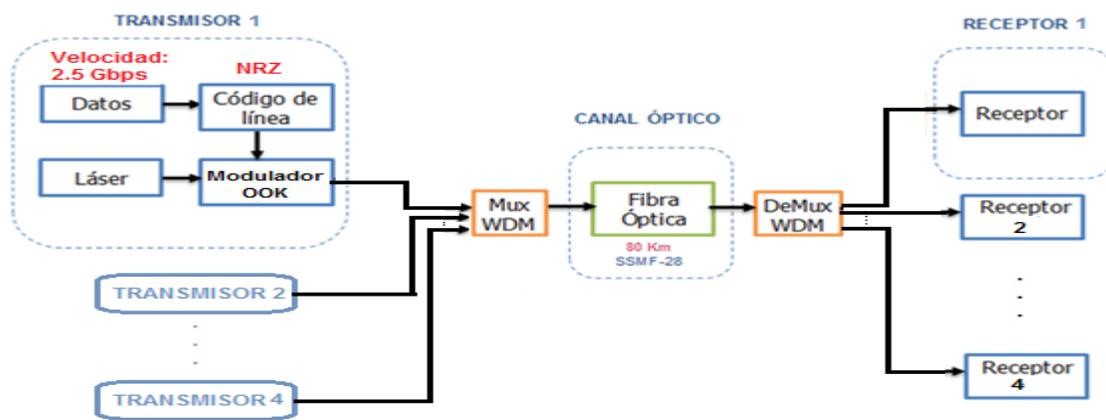
Figura 23. Caso de estudio 2.



Escenario 2: este escenario está configurado para el formato de modulación RZ-DPSK y consta de los siguientes casos de estudio

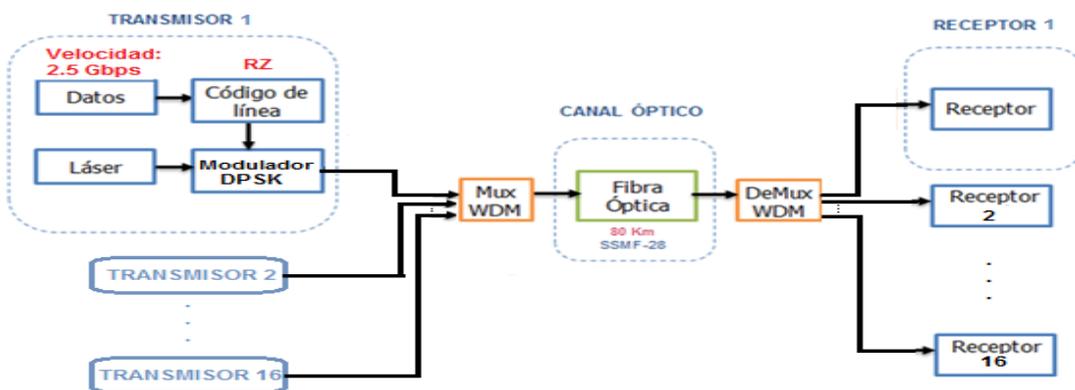
- Caso de estudio 3: Tasa de Transmisión: 2.5 Gbps.
Espaciamiento: 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz.
Canales: 4 (2.5 Gbps por lambda).
Velocidad a Nivel de Transporte: 10 Gbps

Figura 24. Caso de estudio 3.



- Caso de estudio 4: Tasa de Transmisión: 2.5 Gbps.
Espaciamiento: 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz.
Número de Canales: 16 (2.5Gbps por lambda).
Velocidad a Nivel de Transporte: 40 Gbps

Figura 25. Caso de estudio 4.



2.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Se configuran dos escenarios de simulación mediante el análisis teórico de los formatos NRZ-OOK y RZ-DPSK realizado en el capítulo anterior, para luego ser implementados en la construcción del modelo de simulación, con el fin de determinar el impacto del formato de modulación sobre la ISD en una red DWDM a 10 Gbps y 40 Gbps.

Para el presente trabajo de grado, el análisis de simulación se hace sobre un enlace óptico punto a punto de 80 Km ya que este valor está dentro del rango típico para un enlace DWDM, además se utiliza una fibra tipo SMF-28 puesto que esta es el tipo de fibra óptica estándar y con mayor implementación en redes DWDM comerciales [56] ligadas a las características mostradas en la Tabla siguiente:

Tabla 5. Parámetros de la Fibra Corning SSMF-28 [56].

Atributo	Detalle	Valor
Diámetro de campo modal	Rango de valores nominales	8.6 - 9.5 μm
	Tolerancia	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	Nominal	125 μm
	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	0.5 $\text{ps/km}^{1/2}$
	Máximo de Fibra Individual	0.2 $\text{ps/km}^{1/2}$
Coefficiente de Dispersión Cromática	1310 nm y 1550 nm	16 ps/nm.km

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 valor de potencia de transmisión de 0 dBm y una sensibilidad del receptor de -30dBm.

Tener en cuenta que en el contexto nacional, las distancias típicas de los enlaces oscilan entre los 80 Km y los 120 Km [12], por lo cual se considera una distancia fija de 80 Km.

Según [12] [57], 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 la siguiente Tabla.

Tabla 6. Características generales de un escenario de Simulación.

Parámetro	Valores
Velocidad del Sistema a nivel de transporte	10 y 40 Gbps
Tecnología de Red	DWDM
Banda	Banda C (1530-1560 nm)
Ventana	alrededor de 1550 nm
Estándar Utilizado	G.652.b
Tipo de fibra	SSMF-28
Atenuación para 1550nm	0.2 dB/Km
Coeficiente de Dispersión 1550nm	17 ps/ nm.km
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de modulación	OOK-NRZ y RZ-DPSK
Potencia de Tx del Láser	0 dBm
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del Rx	-21 y -28 dBm
BER	1e-15

En el desarrollo del presente capítulo se describieron algunos efectos lineales y no lineales, permitiendo comprender cuáles de estas degradaciones pueden afectar de manera significativa el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas sobre redes DWDM.

Por otra parte, se establece que los parámetros de monitoreo utilizados para estimar el desempeño del sistema con respecto al formato de modulación implementado y su incidencia sobre la ISD mediante el análisis de la BER, el factor Q, la OSNR, el diagrama del ojo, y la potencia del canal óptico.

3. DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

En el presente capítulo se define y desarrolla el proceso de simulación y se implementan los casos de estudio de los escenarios definidos en el capítulo 2, mediante la herramienta OptSim® de Synopsis. El análisis de estos casos de estudio está encaminado a determinar cuáles de los efectos lineales y no lineales inciden en el comportamiento de la ISD para la red planteada.

3.1 PLAN DE PRUEBAS

Las recomendaciones ITU-T G.652, ITU-T O.201 y los parámetros de OPM establecen que para un rendimiento aceptable del sistema es necesario un factor Q de 7dB que corresponde a una BER aproximada de $1e-12$ [46] [58], no obstante para el desarrollo del presente trabajo de grado se toma como referencia los valores mínimos implementados por algunos operadores nacionales los cuales definen un factor Q de 20 dB y una BER de $1e-15$ [12].

Para establecer las condiciones óptimas del funcionamiento del sistema se configuran parámetros con valores típicos para este tipo de red, así como también los parámetros establecidos para el tipo de fibra utilizado [58] . La verificación de los casos de estudio definidos en el capítulo 2 se realiza teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

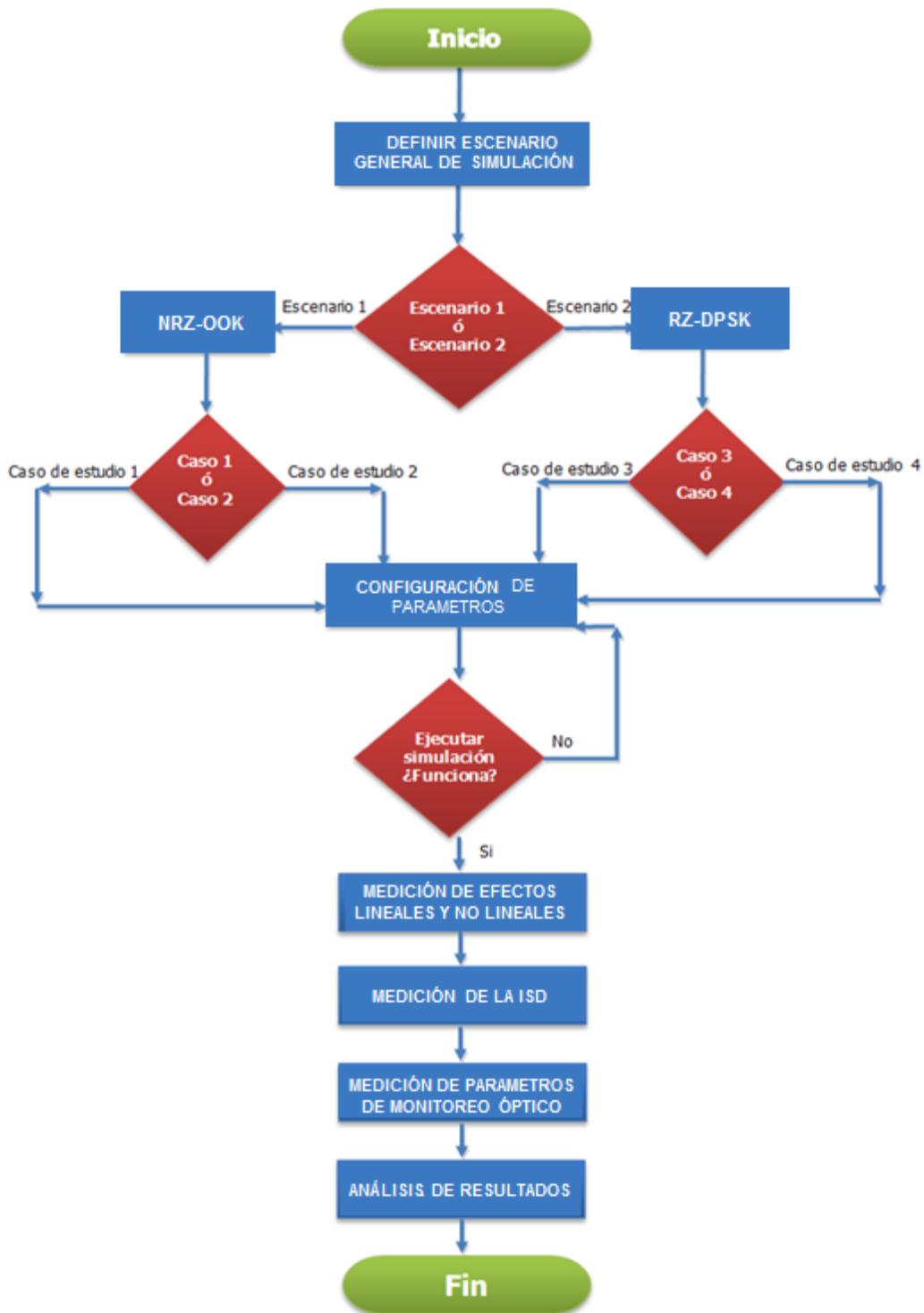
- Relación entre los efectos lineales y no lineales con respecto a la ISD.
- Verificación de los parámetros de monitoreo óptico OPM.

3.2 PROCESO DE SIMULACIÓN

Para el proceso de simulación se implementan los escenarios definidos anteriormente y se realiza un proceso de validación de los casos de estudio correspondientes a cada escenario de simulación con el fin de reunir, procesar y analizar los resultados obtenidos.

En la Figura 26., se puede observar de forma gráfica el algoritmo que integra los pasos para una acertada simulación, cuyos resultados y análisis se muestran en este capítulo.

Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de simulación



3.3 DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS Y CASOS DE ESTUDIO

A continuación, se realiza la simulación de los escenarios y casos de estudio definidos en el capítulo 2, haciendo uso de la herramienta de simulación OptSim® de Synopsis, con el fin de determinar el impacto del formato de modulación sobre la ISD en una red DWDM a 10 Gbps y 40 Gbps a nivel de transporte, además se analiza como los efectos lineales y no lineales inciden en la ISD, en cada uno de los casos de estudio, mediante la observación de los parámetros de monitoreo óptico.

Para definir las longitudes de ondas a diferentes espaciamientos del canal en un sistema DWDM se usó del estándar G.694 de la ITU-T y la ecuación 3.1.

$$\lambda = 195.8 - (n * \text{Espaciamiento}); \quad n = 0,1,2,3 \quad (3.1)$$

Espaciamientos de 25GHz:

$$195.8 - (n * 0.025)$$

Espaciamientos de 50GHz:

$$195.8 - (n * 0.05)$$

Espaciamientos de 100GHz:

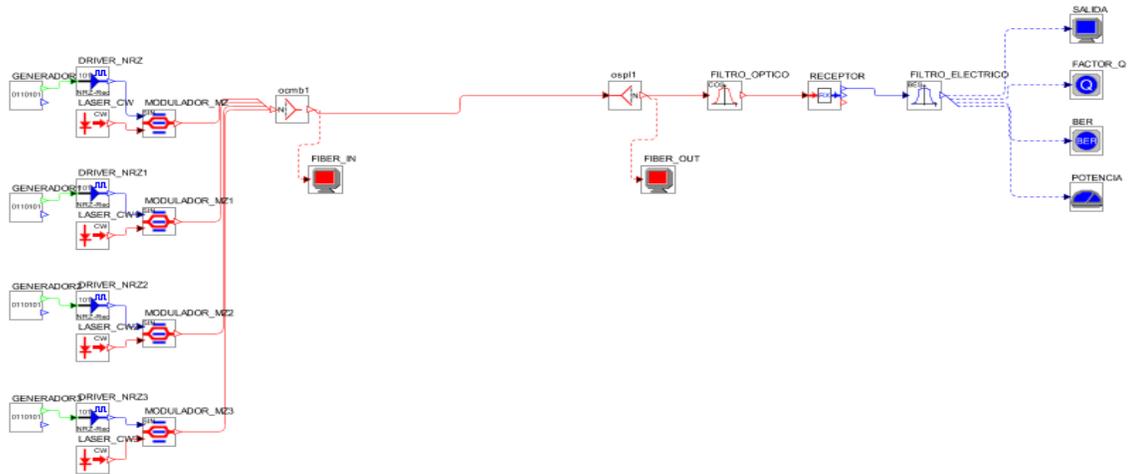
$$195.8 - (n * 0.1)$$

Con $n = 1, 2, 3, \dots, m$

3.3.1 Escenario 1: Formato de modulación NRZ-OOK. Una de las ventajas de este escenario, radica en que requiere de elementos de fácil configuración usados para generar una onda NRZ. En el transmisor, es necesario utilizar un driver NRZ rectangular, un láser de modulación externa y un modulador MZ de seno cuadrado, mientras que en el receptor es necesario un filtro eléctrico y óptico centrado a la frecuencia de trabajo y un receptor con una sensibilidad aceptable.

3.3.1.1 Caso de Estudio 1: Formato de modulación NRZ-OOK con 4 canales a 2.5 GHz. Para este caso de estudio, se analiza de un sistema DWDM, con un formato de modulación NRZ-OOK, en el que se implementan cuatro longitudes de onda diferentes definidas en las frecuencias 195.5 THz, 195.6 THz, 195.7THz y 195.8THz los cuales se obtuvieron de la ecuación (3.1) y se transmiten sobre una fibra estándar SSMF-28, a una velocidad de 2.5 Gbps a nivel de acceso, para finalmente obtener 10 Gbps a nivel de transporte. La configuración de este escenario se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Escenario 1: formato de modulación NRZ-OOK



En las Figuras 28 y 29, se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación NRZ-OOK, con respecto al diagrama del ojo y el espectro óptico alrededor de los 195.8 THz en un enlace en configuración back to back, con el fin de verificar que el formato de modulación se ha implementado correctamente antes de interactuar con el medio.

Figura 28. Diagrama del Ojo del Escenario 1 en Configuración Back to Back.

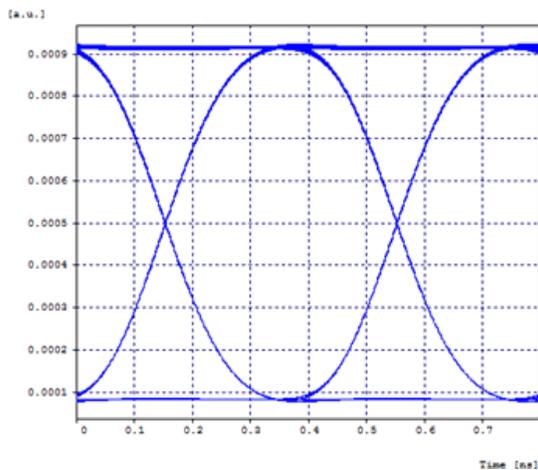
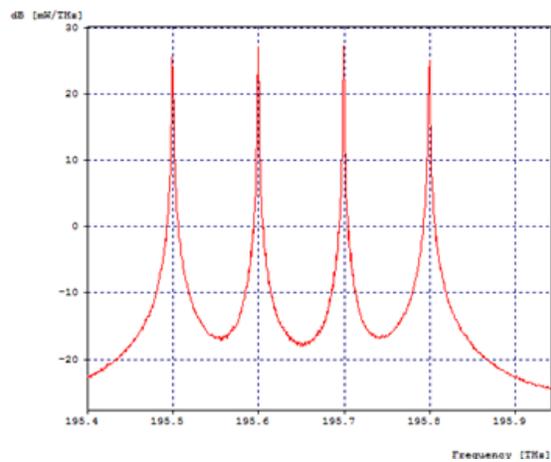


Figura 29. Diagrama del Ojo del Escenario 1 en Configuración Back to Back.



Una vez se obtienen las señales moduladas correctamente, se introduce la fibra SMF-28, se fija la velocidad de transmisión correspondiente a cada caso de estudio y se definen los parámetros fijos que arrojan mejores resultados en el sistema (Ver Tabla 7), los cuales van a servir de comparación con respecto a otros casos de estudio.

Tabla 7. Parámetros Fijos del Sistema

Potencia Laser	0 dBm
Longitud de la Fibra	80 Km
Dispersión Cromática	17 ps/nm/Km
Atenuación	0.2 dB/Km

- Espaciamento entre Canales de 100 GHz.: A continuación se configuran 4 canales (195.5, 195.6, 195.7 y 195.8 THz) espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del formato de modulación en la red de prueba. Los datos obtenidos al simular el caso de estudio 1 bajo esta condición de espaciamento se muestran a continuación.

Tabla 8. Datos de Simulación para 4 canales en el caso de estudio1 (Espaciamento 100GHz).

		Canal 195.8 THz	Canal 195.7 THz	Canal 195.6 THz	Canal 195.5 THz
Potencia [dBm]	TX	0	0	0	0
Potencia [dBm]	RX	-18.93	-18.96	-18.95	-18.95
Factor Q [dB]		28.67	28.66	28.97	28.97
BER		1e-40	1e-40	1e-40	1e-40
OSNR_{IN} [dB]		33.86	33.87	33.92	34.06
OSNR_{RX} [dB]		35.04	34.87	34.51	34.85

Como se puede observar en la Tabla anterior, los valores obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico para cada canal son similares entre sí, por lo

tanto, dado que el comportamiento de los canales a frecuencias próximas se analiza sobre el mismo medio de transmisión y las características de este no van a cambiar en el tiempo por efectos de temperatura o potencia, se analiza en el presente trabajo de grado el comportamiento de solo uno de los canales transmitidos (195.8 THz).

Figura 30. Diagrama del Ojo en Recepción del Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).

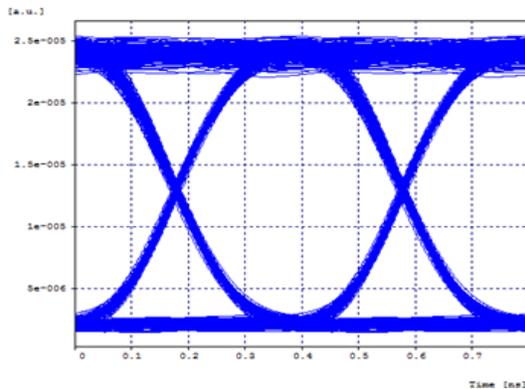
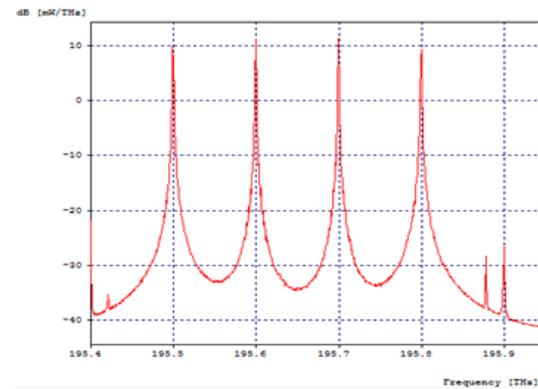


Figura 31. Espectro en Recepción del Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).



En la Figura 30, se observa el diagrama del ojo para el canal 195.8 THz, el cual en su región de la marca de unos (parte superior del diagrama) muestra dispersión de datos como consecuencia del ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo (centro del diagrama) se muestra simetría en los cruces de tiempo, lo cual indica que en este caso la dispersión cromática no es un factor degradante del sistema. En la Figura 31, se tiene el espectro de la señal en el receptor, en ella se observan los cuatro canales transmitidos originalmente además de pequeños canales adicionales, como producto del efecto FWM o mezcla de cuatro ondas, esto quiere decir que en algún momento, las señales transmitidas entran en coincidencia de fase.

Figura 32. Espectro óptico de entrada (Rojo) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (Café) - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).

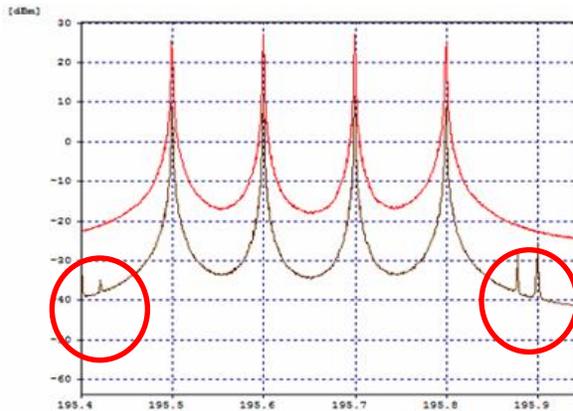
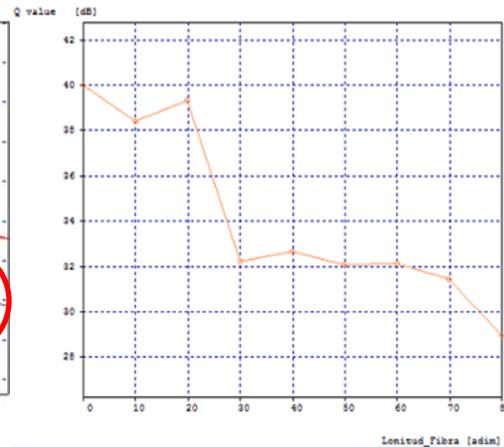


Figura 33. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).



La Figura 32, muestra el espectro de las señales de entrada (Rojo) y de salida (Café) del sistema, en el cual se observa que no hay ensanchamiento de los canales, es decir que no hay presencia de SPM y tampoco de XPM pues los pulsos en el receptor no sufren ningún tipo de distorsión, solo se ven afectados por la atenuación introducida por la fibra, sin embargo un efecto no lineal que si se hace evidente en este caso es la FWM como se observa en los círculos rojos, ya que en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales pueden llegar a coincidir con algún canal original produciendo distorsión o pérdida de la información.

Otro parámetro importante para medir el desempeño del sistema es el Factor Q, en la Figura 33, se observa la variación de este con respecto la longitud de la fibra, mediante una relación inversamente proporcional, sin embargo en las longitudes que están entre los 10 Km y los 20 Km, así como también en las comprendidas entre 30 Km y 40 Km la recta que representa esta relación, tiene un cambio de pendiente, es decir, que en las distancias mencionadas el desempeño de la red tiende a mejorar, esto se debe a la dependencia que existe entre la dispersión cromática, la atenuación, la BER, los efectos de tipo lineal y no lineal presentes en el sistema y el Factor Q, los cuales pueden mejorar o deteriorar la calidad de la red, sin embargo para las longitudes comprendidas entre los 50 Km y 60 Km, la relación se mantiene constante.

La BER es un parámetro de monitoreo óptico que está relacionado directamente con el Factor Q, por medio de la ecuación (3.2), es decir, si el factor Q varía con respecto a la distancia, la BER también debe variar, sin embargo, la Figura 3.8 muestra un comportamiento constante de la BER con respecto a la variación de la longitud de la fibra, esto se debe a que la función que relaciona estas dos variables (Erfc, complementary error function), es una aproximación, por lo tanto al obtener valores altos para el factor Q, la función erfc toma el mejor y más probable valor para la BER, en este caso 1e-40 y lo asume como constante [O.201 ITU-T] como se muestra en la Figura 34.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.2)$$

La Figura 34 muestra el comportamiento inverso de la potencia con relación a la longitud de la fibra, entre más fibra se tenga en el enlace, se introduce más atenuación y pérdidas en el mismo, por lo tanto a pesar de tener una potencia constante en la transmisión, la potencia en recepción es cada vez menor.

Figura 34. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).

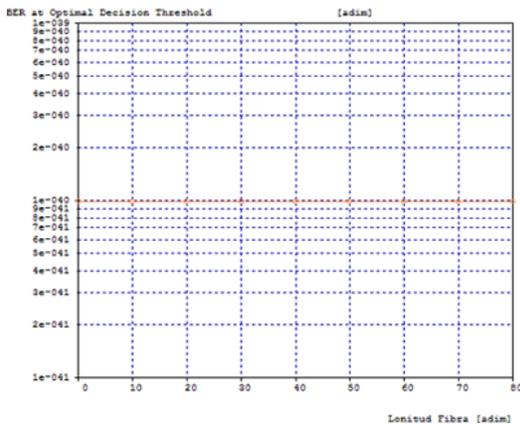
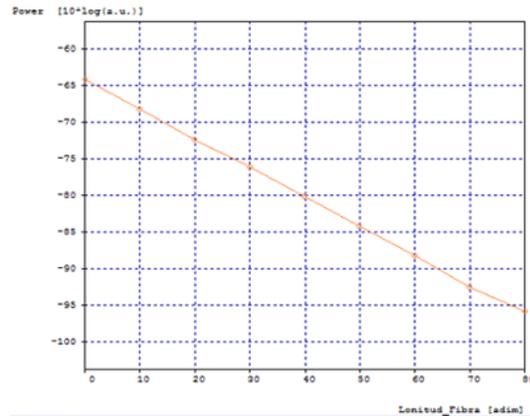


Figura 35. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 100GHz).



- Espaciamiento entre Canales 50 GHz: Una vez realizado el análisis para la red con canales ampliamente espaciados (100 GHz), se procede a disminuir este espaciamiento para determinar la dependencia del mismo con el funcionamiento óptimo del sistema y comprobar si es posible transmitir la

misma cantidad de información en la mitad del ancho de banda. Los datos obtenidos de esta simulación se muestran a continuación en la siguiente Tabla.

Tabla 9. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).

Canal 195.8 THz	
Potencia T_X [dBm]	0
Potencia R_X [dBm]	-18.93
Factor Q [dB]	29.17
BER	1e-40
OSNR IN [dB]	33.90
OSNR R_X [dB]	29.36

En la Figura 36 se observa el diagrama del ojo para el canal 195.8 THz, el cual en su región de la marca de unos presenta un nivel de dispersión de datos un poco mayor que la introducida por los canales espaciados 100 GHz, lo que indica que al reducir el espaciamiento, se introduce más ruido en la señal, en la región de la apertura del ojo se muestra simetría en los cruces de tiempo, es decir, que en este caso la dispersión cromática no es un factor degradante de la señal. En la Figura 3.12, se tiene el espectro de la señal en el receptor, en él se observan los cuatro canales transmitidos además de pequeños canales adicionales, como producto del efecto FWM o mezcla de cuatro ondas, esto quiere decir que en algún momento, las señales transmitidas entran en coincidencia de fase

Figura 36. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).

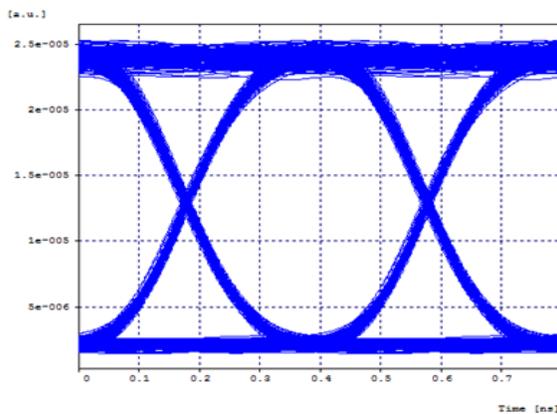
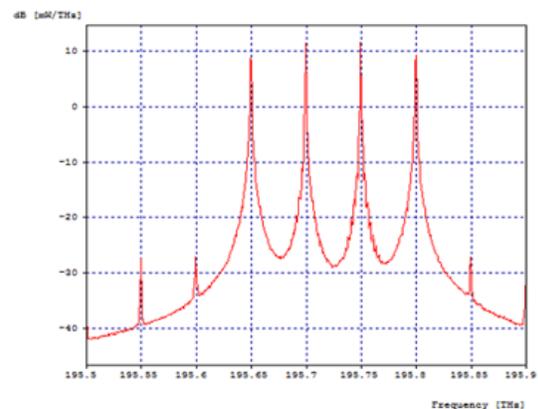


Figura 37. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).



La Figura 38 muestra el espectro de entrada y de salida del sistema, en el cual se observa que no hay ensanchamiento de los canales, es decir que no hay presencia de SPM y tampoco de XPM pues los pulsos en el receptor no sufren ningún tipo de distorsión, solo se ven afectados por la atenuación introducida por la fibra, sin embargo un efecto no lineal que si se hace evidente en este caso es la FWM, ya que en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales pueden llegar a coincidir con algún canal original produciendo distorsión o perdida de la información, esta Figura también muestra como automáticamente al disminuir el espaciado entre canales a la mitad, el ancho de banda usado por la señal también se reduce lo cual indica que se está transmitiendo la misma cantidad de información en un menos ancho de banda.

Con respecto al Factor Q, en la Figura 39, se observa el comportamiento inversamente proporcional que este presenta con respecto a la longitud de la fibra, es decir que entre más grande sea el tramo de fibra, menor Factor Q en el sistema.

Figura 38. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).

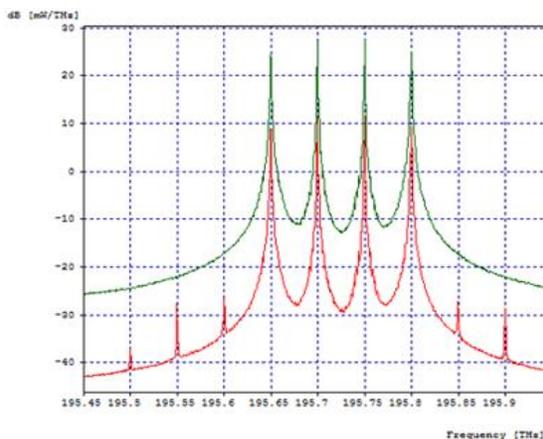
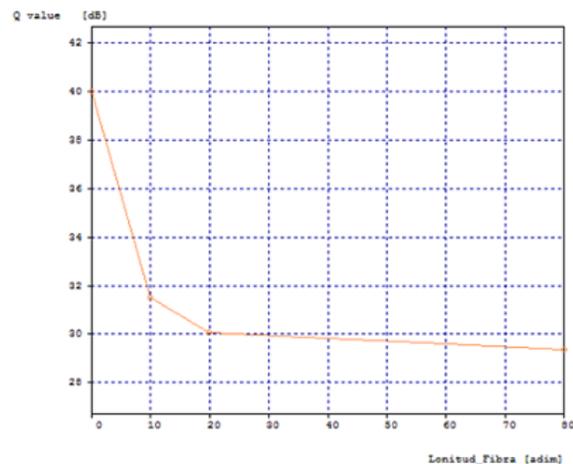


Figura 39. Factor Q vs Longitud de Fibra – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).



La Figura 40 muestra una relación constante entre la BER y la longitud de la fibra, la cual como se explicó anteriormente, se debe a las aproximaciones hechas por la función que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación (3.2), en este caso, los valores altos para el factor Q, ocasionan que la función erfc tome el mejor y más probable valor para la BER = $1e-40$ y lo asuma como constante.

La potencia en el receptor tiene una relación inversa con la distancia del enlace, debido a las pérdidas y atenuaciones introducidas por el mismo, como se observa en la Figura 41 donde la potencia percibida por el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 40. BER vs Longitud de la Fibra – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).

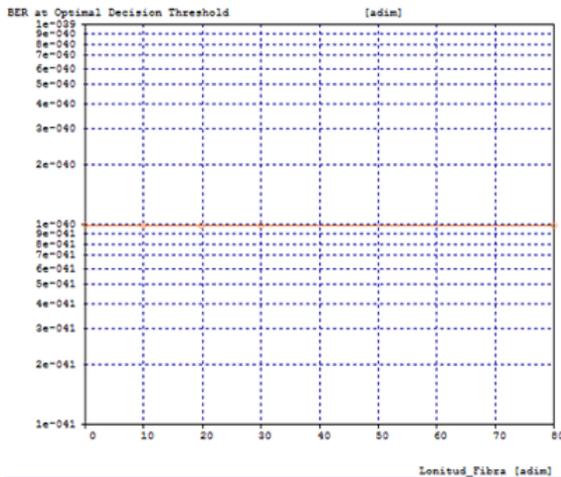
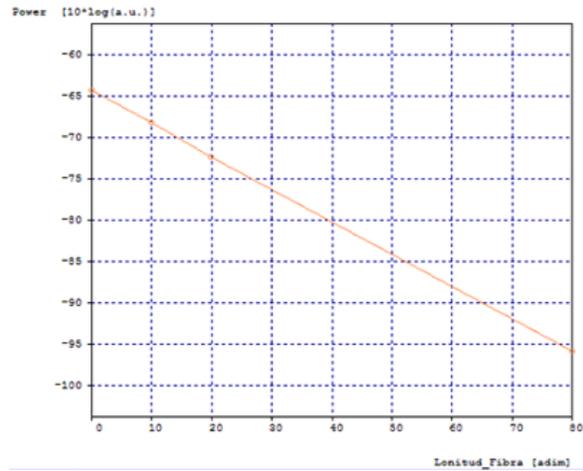


Figura 41. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 50GHz).



- Espaciamiento entre Canales de 25 GHz: A continuación se prueba el desempeño de la red, disminuyendo el espaciamiento entre canales a una cuarta parte del inicial, es decir a 25GHz con el fin de determinar si con esta configuración es posible transmitir el mismo flujo de datos y al mismo tiempo reducir el ancho de banda ocupado, los datos obtenidos de esta simulación para el canal de prueba se muestran a continuación.

Tabla 10. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz – Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-18.93
Factor Q [dB]	17.45
BER	4.25e-14
OSNR_{IN} [dB]	33.90
OSNR_{RX} [dB]	21.15

A pesar de que los canales transmitidos se encuentran próximos entre sí, el sistema cumple con los estándares de calidad (BER=1e-12 y Factor Q=7) estimados para este tipo de red [47], sin embargo, no alcanza a cumplir con los parámetros objetivo de este trabajo de grado (BER=1e-15 y Factor Q=20), además al realizar el análisis del diagrama del ojo y espectro obtenidos de la herramienta de simulación, la presencia de efectos lineales y no lineales se hace más evidente comparada con los casos anteriores donde el espaciamiento entre canales era mayor.

La Figura 42., muestra un diagrama del ojo con dispersión de datos en la marca de los unos más que en la de los ceros, lo cual indica que el sistema está siendo afectado por el ruido, en la apertura del ojo se observa que no hay simetría en los cruces de tiempo, es decir que la CD se hace presente en este caso y cobra importancia cuando los canales no se encuentran ampliamente espaciados, además en los círculos rojos también se observa un desplazamiento de los cruces de tiempo con lo que se evidencia la existencia de PMD en el sistema, mientras que la Figura 43 que corresponde al espectro de la señal en el receptor, muestra cómo se reduce el ancho de banda ocupado para la transmisión de la señal, sin embargo, existe presencia de canales adicionales de mayor tamaño comprado con los casos anteriores, estos son producto del efecto FWM o mezcla de cuatro ondas, ya que en algún momento, las señales transmitidas entran en coincidencia de fase.

Figura 42. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).

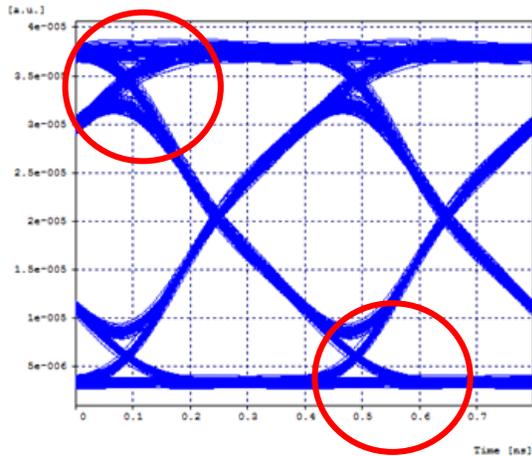
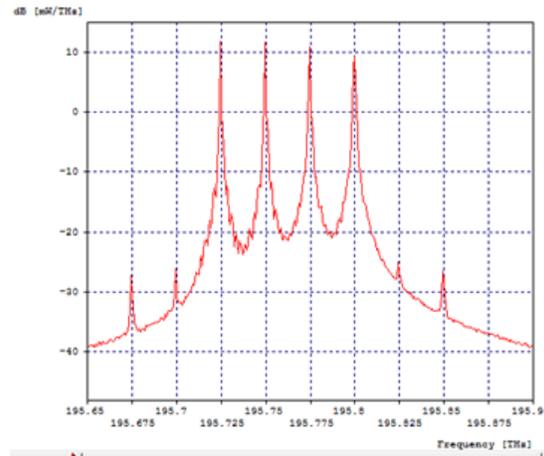


Figura 43. Espectro en Recepción - Caso de Estudio (Espaciamiento 25GHz).



Al superponer los espectros de entrada y de salida como se muestra en la Figura 44, se observa que los canales no sufren ningún tipo de ensanchamiento, es decir que el sistema no está siendo afectado por fenómenos como la SPM y la XPM pues los pulsos en el receptor no presentan ningún tipo de distorsión, por el contrario es evidente que la señal obtenida en el receptor esta atenuada con respecto a la señal transmitida, en este caso la FWM introduce canales de mayor magnitud que en los casos anteriores.

En la Figura 45, en la cual se relaciona el Factor Q del sistema con la longitud de la fibra, se observa como al aumentar la distancia, la calidad del enlace disminuye, este comportamiento se debe a que entre más largo sea el trayecto que la señal debe recorrer, mayor es la atenuación y el ruido introducidos a la señal y también mayor presencia de efectos lineales y no lineales que degradan la transmisión.

Figura 44. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 1 (Espaciamento 25GHz).

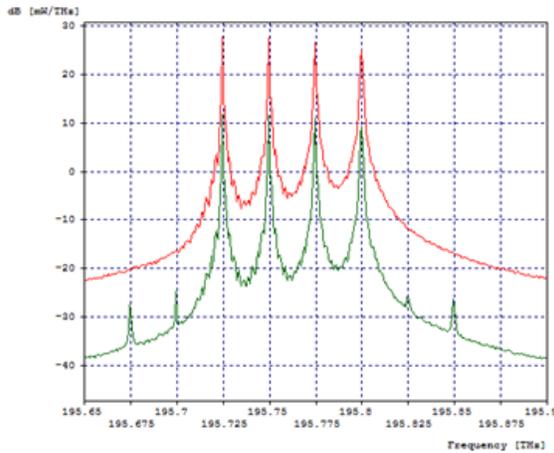
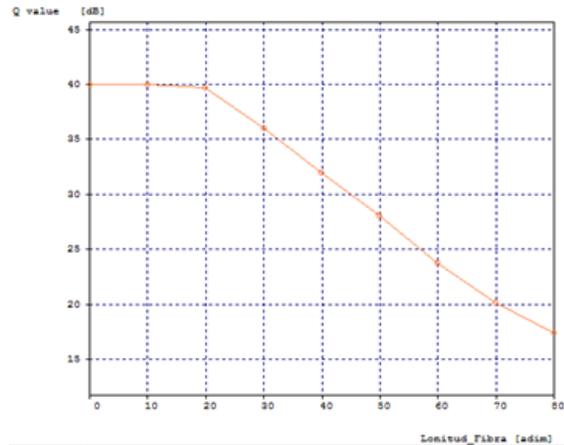


Figura 45. Factor Q vs Longitud de la - Caso de Estudio 1 (Espaciamento 25GHz).



La Figura 46, muestra la relación entre la BER y la Longitud de la Fibra, a diferencia de los casos anteriores, la BER no se mantiene constante para todos los valores de longitud, esto se debe a que el Factor Q alcanza valores lo suficientemente bajos para que la función que relaciona estos dos parámetros en la ecuación (3.2) arroje valores variables para la BER, el cual será más alto entre más bajo es el valor del Factor Q. Las pérdidas y atenuaciones introducidas por la longitud de la fibra se muestran en la Figura 47, donde la potencia en el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 46. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).

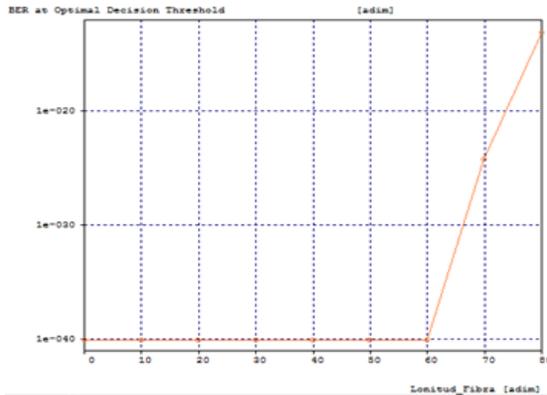
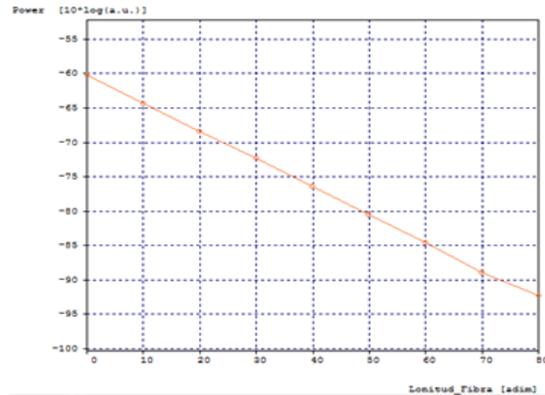


Figura 47. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra- Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).



Con el fin de solucionar los problemas de transmisión observados al simular el sistema planteado para el caso de estudio 1, con espaciamento entre canales de 25 GHz, se procede a implementar en la red de prueba, un módulo de fibra DCF compensando al 100, 75, 50 y 25 % para seleccionar de estos el menor porcentaje de compensación necesario para que los parámetros de calidad de calidad cumplan con los estándares establecidos para la transmisión en una red DWDM. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 11. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz) compensado al 100%, 75%, 50% y 25%.

		Canal 195.8 THz Compensado al 100%	Canal 195.8 THz Compensado al 75%	Canal 195.8 THz Compensado al 50%	Canal 195.8 THz Compensado al 25%
Potencia [dBm]	T _x	0	0	0	0
Potencia [dBm]	R _x	-19.04	-19.03	-19.06	-19.06
Factor Q [dB]		34.09	34.09	31.74	24.90
BER		1e-40	1e-40	1e-40	1e-40
OSNR _{IN} [dB]		33.90	33.91	33.91	33.91
OSNR _{RX} [dB]		20.27	21.42	20.27	20.20

Como se observa en la Tabla 11, compensar al 25% correspondiente a un módulo de fibra DCF de 3.6 Km de longitud, es suficiente para que los parámetros obtenidos de la simulación se aproximen a los obtenidos con canales ampliamente espaciados (100 GHz), a continuación se muestran los datos obtenidos al realizar Compensación Del 25% En La Red De Prueba.

- Espaciamiento entre Canales de 25 Ghz con Compensación al 25%:

Tabla 12. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%) vs Canal 195.8 THz (Espaciados a 100 GHz, sin Compensación)

	Canal 195.8 THz (Espaciados a 100 GHz, sin Compensación)	Canal 195.8 THz (Espaciados a 25 GHz, Compensado a 25%)
Potencia T_x [dBm]	0	0
Potencia R_x [dBm]	-18.93	-19.06
Factor Q [dB]	28.67	24.90
BER	1e-40	1e-40
OSNR_{IN} [dB]	33.86	33.91
OSNR_{RX} [dB]	35.04	20.20

En el Tabla 12, se observa que al compensar tan solo al 25% la red de prueba con canales espaciados a 25GHz, se obtienen mejores resultados que los obtenidos al simular con un espaciamiento entre canales de 100 GHz sin compensación, además, al compensar al 50, 75 y 100% se necesitan de más kilómetros de fibra DCF y los resultados son similares a los obtenidos con una compensación del 25% en la cual solo son necesarios 3.6 Km de fibra DCF.

Las mejoras introducidas por la compensación se pueden observar en la Figura 48, donde se muestra un diagrama del ojo con poca dispersión en las marcas de los ceros y unos, lo que significa que aunque hay presencia de ruido, esta no es tan crítica como la que se presenta en los casos en los que no se realiza compensación, además se evidencia una mejora sustancial de la simetría de la apertura del ojo y los cruces de tiempo, es decir que compensar la red, atenuó sustancialmente los efectos de la CD en el sistema.

En cuanto al espectro de la señal en el receptor que se muestra en la Figura 49., a pesar de todas las mejoras que introduce la compensación, se siguen haciendo presente canales adicionales a los transmitidos y la potencia de recepción sigue

siendo igual al caso en el que no hay módulo DCF, es decir que el efecto FWM y de la atenuación, no se elimina ni mejora con la compensación de la fibra.

Figura 48. Diagrama del Ojo compensado al 25%- Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).

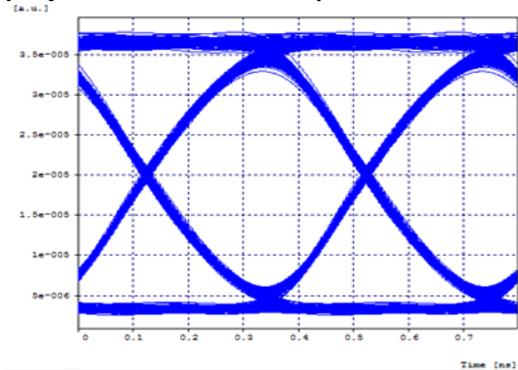
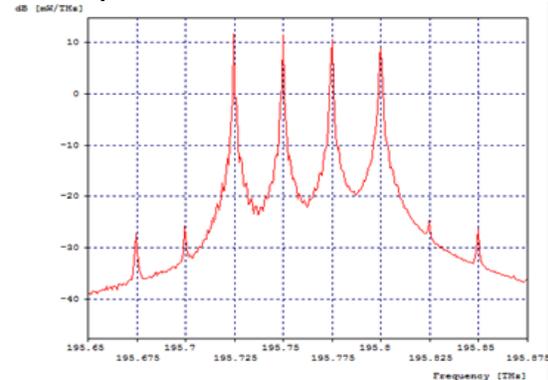


Figura 49. Espectro compensado al 25%- Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz).



La Figura 50 hace una comparación de los espectros de entrada y salida del sistema, se observa que no hay ensanchamiento de los canales, sin embargo es evidente la presencia de FWM y atenuación como se mencionó anteriormente.

Para el caso en el que se introduce compensación, la Figura 51 muestra como a medida que la longitud de la fibra aumenta, el valor del Factor Q sufre algunos cambios, inicialmente tiende a mejorar pero se mantiene en valores muy cercanos, casi constante hasta aproximadamente los 40 km de fibra, posteriormente la pendiente de la relación se vuelve negativa, es decir que el valor para el Factor Q desciende constantemente para los demás valores de longitud, esto se debe a la dependencia que existe entre la dispersión cromática, la atenuación, la BER, los efectos de tipo lineal y no lineal presentes en el sistema y el Factor Q, los cuales pueden mejorar o deteriorar la calidad de la red.

Figura 50. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).

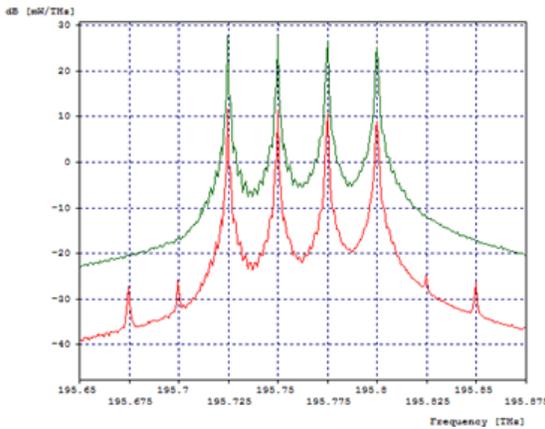
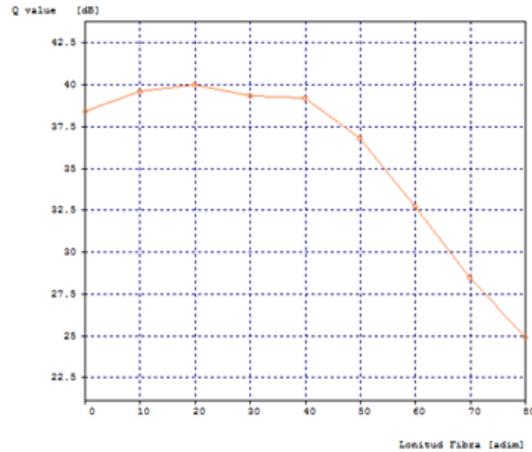


Figura 51. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).



La Figura 52, muestra una relación constante entre la BER y la longitud de la fibra, esto se debe a las aproximaciones hechas por la función que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación (3.2), en este caso, los valores altos para el factor Q, ocasionan que la función Erfc tome el mejor y más probable valor para la $\text{BER} = 1e-40$ y lo asuma como constante.

Las pérdidas y atenuaciones introducidas por la longitud de la fibra se muestran en la Figura 53, donde la potencia en el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta, es decir que después de 80 Km, en el receptor se tiene una señal atenuada en 55 dB aproximadamente.

Figura 52. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).

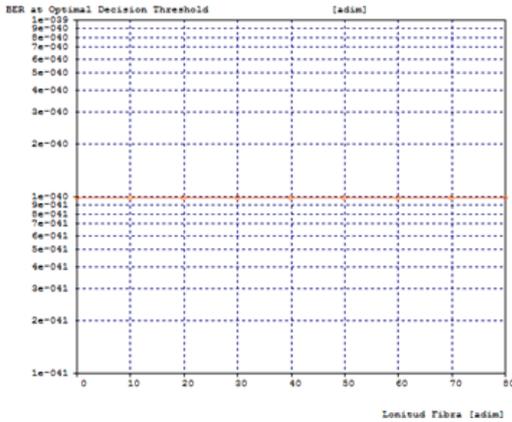
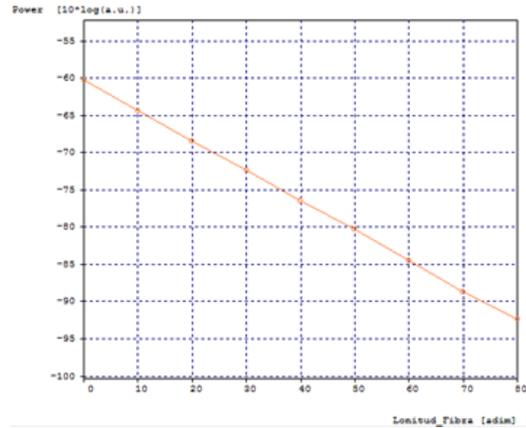


Figura 53. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 1 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 25%).



Para finalizar, es necesario analizar como las variaciones anteriores en la red de prueba, pueden mejorar o no la ISD, para esto se hace uso de las ecuaciones (1.3) y (1.5) planteadas en el capítulo 1, los resultados obtenidos se observan en la Tabla 13.

Tabla 13. Cálculo del ancho de banda del sistema NRZ-OOK para 4 canales de 2.5GHz

Caso de Estudio 1: NRZ-OOK 4 Canales de 2.5 GHz			
Espaciamiento [GHz]	BW por Canal [GHz]	OSNR por Canal [dB]	BW sistema [THz]
100	4	35.04	0.3
50	4	29.36	0.15
25	4	21.15	0.075
25 +DCF	4	2020	0.075

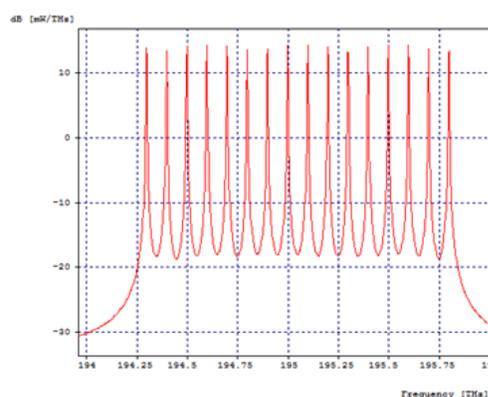
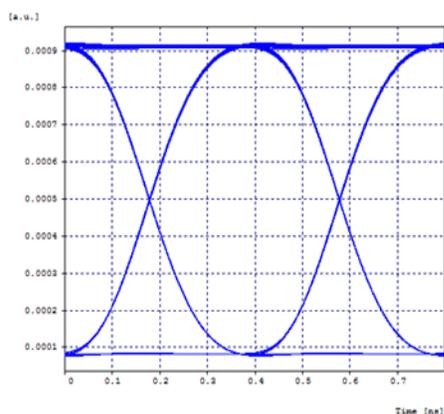
Retomando la definición del capítulo 1, donde se establece que la ISD es la tasa de bits máxima alcanzable con n longitudes de onda que se pueden implementar en un mismo canal ($\lambda=2,3,\dots, n.$), para un ancho de banda específico ($B1=B2=Bn$) y teniendo en cuenta los datos obtenidos de la Tabla 13. se concluye que en la red

de prueba para el formato de modulación NRZ-OOK con cuatro longitudes de onda a 2.5 Gbps es posible reducir el espaciamiento entre canales, es decir mejorar la ISD al transportar la misma cantidad de información a la misma velocidad haciendo uso de un menor ancho de banda en el sistema, siempre y cuando se implementen módulos DCF que compensen los efectos lineales, no lineales y demás degradaciones ópticas que se presentan en la red cuando los canales son próximos entre sí.

3.3.1.2 Caso de Estudio 2: Formato de modulación NRZ-OOK, Velocidad de 40 Gbps en 16 Longitudes de Onda de 2.5 Gbps. Para este caso de estudio, se realiza el análisis de un sistema DWDM, con un formato de modulación NRZ-OOK, en el que se implementan diez y seis longitudes de onda diferentes obtenidas de la ecuación (3.1), las cuales se transmiten sobre una fibra estándar SSMF-28, a una velocidad de 2.5 Gbps a nivel de acceso, para finalmente obtener 40 Gbps a nivel de transporte. La configuración de este escenario se muestra en la Figura 54.

En las Figuras 55 y 56, se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación NRZ-OOK, con respecto al diagrama del ojo y el espectro óptico alrededor de los 195.8 THz en un enlace back to back, con el fin de verificar que el formato de modulación se está implementando correctamente antes de interactuar con el medio.

Figura 55. Diagrama del ojo Caso de Estudio 2-Configuración BACK to BACK **Figura 56. Espectro Caso de Estudio 2-Configuración BACK to BACK**



- Espaciamiento entre Canales de 100 GHz: Para este caso de estudio se configuran diez y seis canales espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del formato de modulación en la red de prueba. Los datos obtenidos al simular el caso de estudio 2 bajo esta condición de espaciamiento se muestran a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100 GHz).

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-19.23
Factor Q [dB]	25.65
BER	1e-40
OSNR IN [dB]	28.63
OSNR R_x [dB]	28.57

Al igual que en el Caso 1, dado que el comportamiento de los diferentes canales a frecuencias próximas se analiza sobre el mismo medio de transmisión y las características de este no van a cambiar en el tiempo ni por efectos de temperatura o potencia, se analizara el comportamiento de solo uno de los canales transmitidos (195.8 THz).

En la Figura 57, se observa el diagrama del ojo para el canal 195.8 THz, el cual en su región de la marca de unos, presenta un nivel alto de dispersión de datos debido al ruido presente en la señal, en la región de la apertura del ojo, se muestra simetría en los cruces de tiempo y en la apertura del ojo, lo cual indica que en este caso la dispersión cromática no es un factor degradante del sistema.

En la Figura 58, se tiene el espectro de la señal en el receptor, en ella se observan los diez y seis canales transmitidos además de pequeños canales adicionales, como producto del efecto FWM o mezcla de cuatro ondas, esto quiere decir que en algún momento, las señales transmitidas entran en coincidencia de fase, este inconveniente puede provocar pérdida de información o deterioro de la misma.

Figura 57. Diagrama del Ojo del Caso de Estudio 2 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).

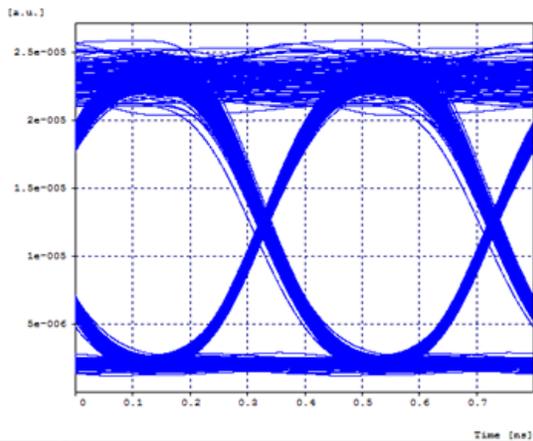
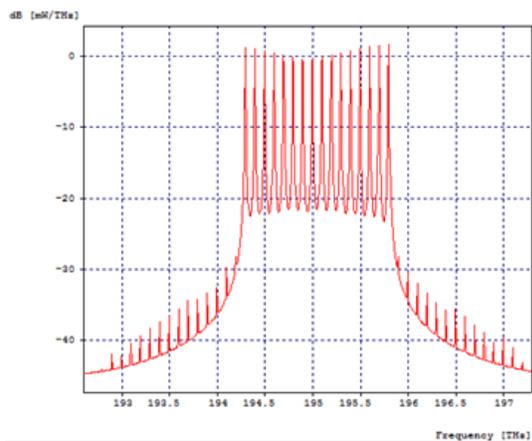


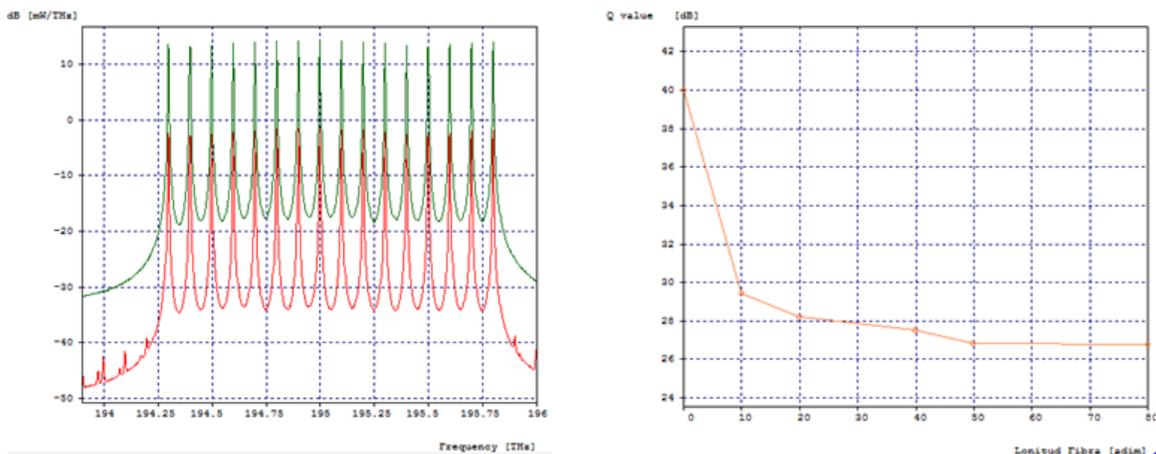
Figura 58. Espectro para el Caso de Estudio 2 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).



La Figura 59, compara los espectros de entrada y de salida del sistema, en ella se observa que la señal que se obtiene en el receptor esta atenuada pero sus pulsos no sufren ningún ensanchamiento ni distorsión, también se observa presencia de FWM, al generarse 17 pulsos adicionales a los transmitidos originalmente.

La Figura 60, muestra la relación entre el factor Q y la Longitud de la Fibra, donde a medida que la longitud de la fibra aumenta, el factor Q va disminuyendo de manera lineal, la pendiente de esta relación no es constante debido a las dependencias del factor Q con otros factores tanto lineales como no lineales que en determinado momento pueden mejorar o empeorar el rendimiento del sistema.

Figura 59. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz). **Figura 60. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz).**



La Figura 61, muestra una relación constante entre la BER y la longitud de la fibra, la cual como se explicó anteriormente, se debe a las aproximaciones hechas por la función que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación (3.2), en este caso, los valores altos para el factor Q, ocasionan que la función Ercf tome el mejor y más probable valor para la BER = 1e-40 y lo asuma como constante.

La potencia en el receptor tiene una relación inversa con la distancia del enlace, debido a las pérdidas y atenuaciones introducidas por el mismo, como se observa en la Figura 62, donde la potencia percibida por el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 61. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz).

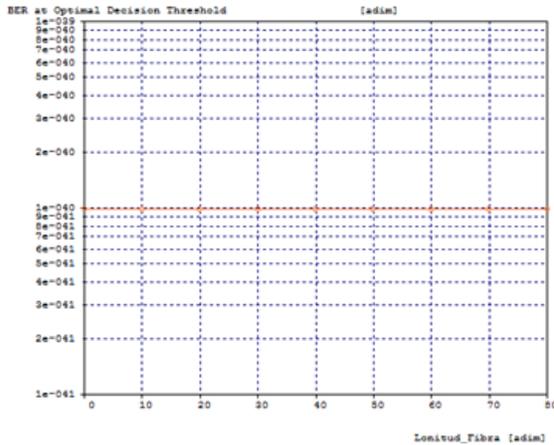
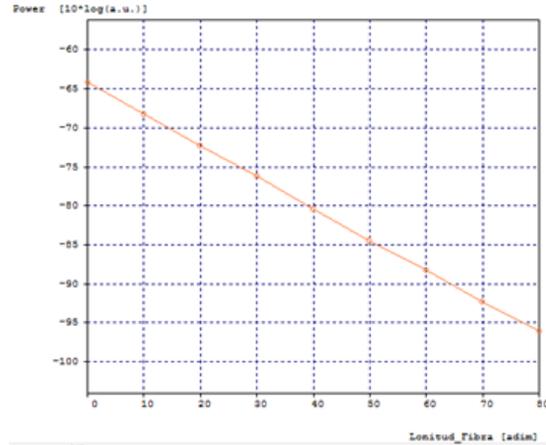


Figura 62. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 100GHz).



- Espaciamiento entre Canales de 50 GHz: A continuación se procede a disminuir este espaciamiento entre canales hasta 50 GHz para determinar la dependencia del mismo con el funcionamiento óptimo de la red de prueba y comprobar que se puede transmitir la misma cantidad de información en la mitad del ancho de banda, mejorando de esta manera la ISD del sistema. Los datos obtenidos de esta simulación se muestran a continuación.

Tabla 15. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50 GHz)

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-19.19
Factor Q [dB]	24.60
BER	1e-40
OSNR IN [dB]	22.78
OSNR R_x [dB]	22.52

La Figura 63, muestra un diagrama del ojo altamente afectado por el ruido, esto se puede observar por la cantidad de dispersión que se presenta en la marca de los unos, sin embargo tanto el cruce de tiempo como la apertura del ojo se mantiene simétrico, lo cual indica que la dispersión cromática en el sistema aun no es

considerable, mientras tanto, en la Figura 64, se observa el espectro de la señal en el receptor, se evidencian claramente los diez y seis canales transmitidos originalmente junto a algunos tonos adicionales que se producen debido a la reducción del espaciado entre canales, el aumento del número de canales transmitido y la dispersión intrínseca de la fibra implementada.

Figura 63. Diagrama del Ojo del Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamento 50GHz).

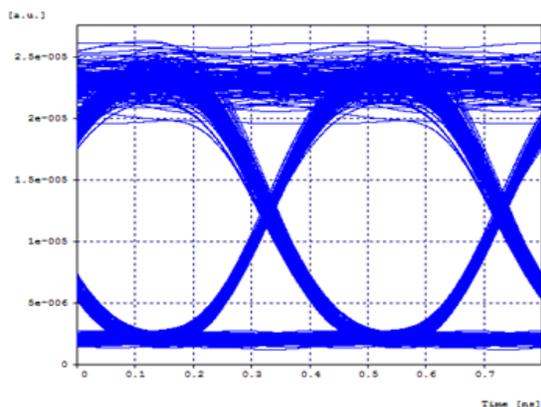
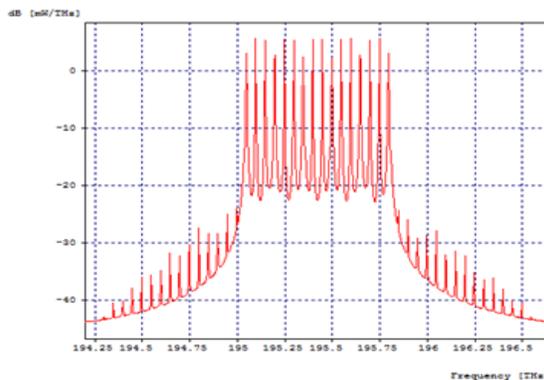


Figura 64. Espectro del Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamento 50GHz).



La Figura 65, muestra el espectro de entrada y de salida del sistema, en el cual se observa que no hay ensanchamiento de los canales, es decir que no hay presencia de SPM y tampoco de XPM pues los pulsos en el receptor no sufren ningún tipo de distorsión, solo se ven afectados por la atenuación introducida por la fibra, sin embargo la FWM sigue estando presente y ahora con mayor intensidad debido a la reducción del espaciado entre canales, ya que en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales pueden llegar a coincidir con algún canal original produciendo distorsión o pérdida de la información, esta Figura también muestra como automáticamente al disminuir el espaciado entre canales a la mitad, el ancho de banda usado por la señal también se reduce lo cual indica que se está transmitiendo la misma cantidad de información en un menos ancho de banda, es decir que se mejora la ISD del sistema.

Con respecto al Factor Q, en la Figura 66, se observa el comportamiento inversamente proporcional que este presenta con respecto a la longitud de la fibra,

es decir que entre más grande sea el tramo de fibra, menor Factor Q en el sistema.

Figura 65. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio (Espaciamiento 50GHz).

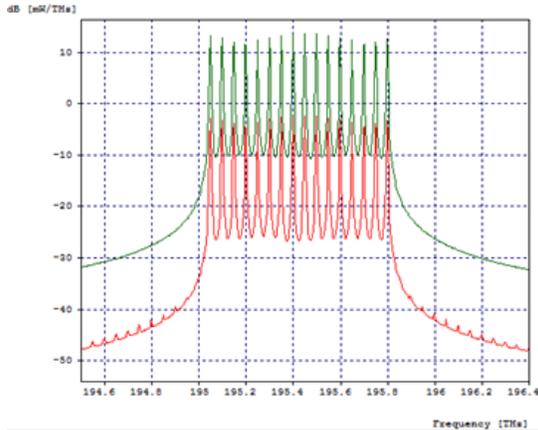
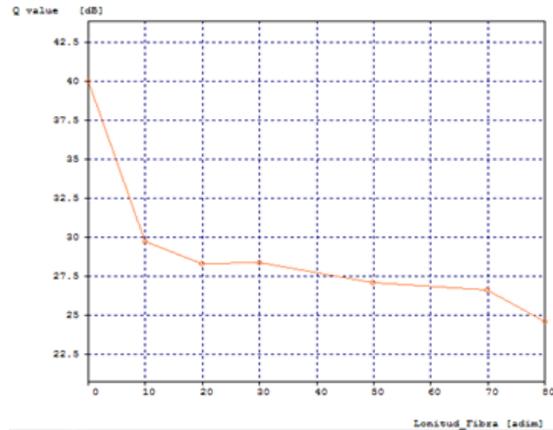


Figura 66. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50GHz).



La Figura 67, muestra una relación constante entre la BER y la longitud de la fibra, la cual como se explicó anteriormente, se debe a las aproximaciones hechas por la función que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación (3.2), en este caso, los valores altos para el factor Q, ocasionan que la función erfc tome el mejor y más probable valor para la $\text{BER} = 1e-40$ y lo asuma como constante.

La potencia en el receptor tiene una relación inversa con la distancia del enlace, debido a las pérdidas y atenuaciones introducidas por el mismo, como se observa en la Figura 68, donde la potencia percibida por el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 67. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50GHz).

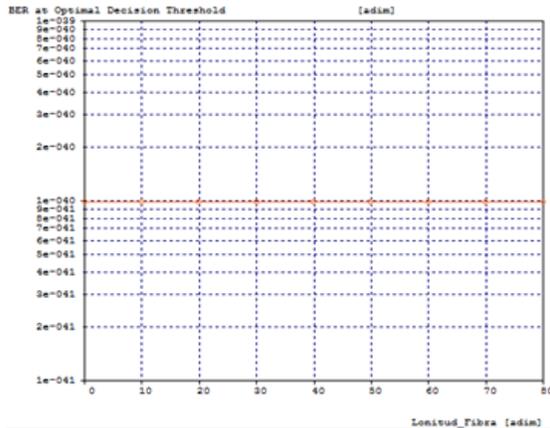
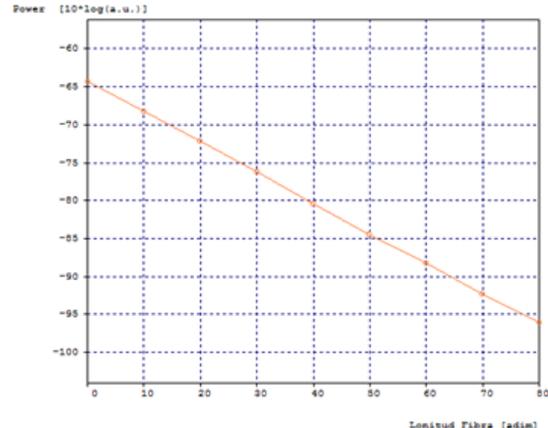


Figura 68. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 50GHz).



- Espaciamiento entre Canales de 25 GHz: A continuación disminuye el espaciamiento entre canales a 25GHz, con el fin de transmitir la misma cantidad de información en un menor ancho de banda, los datos obtenidos de esta simulación para el canal de prueba se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 16. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz)

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-19.20
Factor Q [dB]	16.92
BER	2.54e-12
OSNR_{IN} [dB]	13.07
OSNR_{RX} [dB]	12.88

Los datos obtenidos de la simulación para la condición de espaciamiento de 25 GHz que se muestran en la Tabla 16, cumplen con los valores de calidad establecidos para el funcionamiento óptimo del sistema, sin embargo en la Figura 69., se muestra un diagrama del ojo con dispersión de datos en la marca de los unos, con corrimientos en los cruces de tiempo, además no hay simetría en la

apertura del ojo y la línea que lo describe es convexa, es decir que la red bajo estas condiciones de espaciamento se ve altamente afectada por el ruido, la dispersión cromática y la atenuación, por esta razón se hace necesario modificarla introduciendo un módulo de compensación DCF como se mostrara más adelante.

La Figura 69, muestra un diagrama del ojo con dispersión de datos en la marca de los unos más que en la de los ceros, lo cual indica que el sistema está siendo afectado por el ruido, en la apertura del ojo se observa que no hay simetría en los cruces de tiempo y mucho menos en la apertura del ojo, es decir que la CD se hace presente en este caso y cobra importancia cuando los canales no se encuentran ampliamente espaciados, además en los círculos rojos también se observa un desplazamiento de los cruces de tiempo con lo que se evidencia la existencia de PMD en el sistema. En la Figura 70, muestra el espectro de la señal en la cual se observa que además de los diez y seis canales transmitidos, hay presencia de unos nuevos canales generados por la interacción y cercanías de las fases con las que se propaga cada canal, por lo tanto este sistema se ve afectado por la FWM, además también se observa un alto piso de ruido introducido a la señal original.

Figura 69. Diagrama del ojo para Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamento 25GHz).

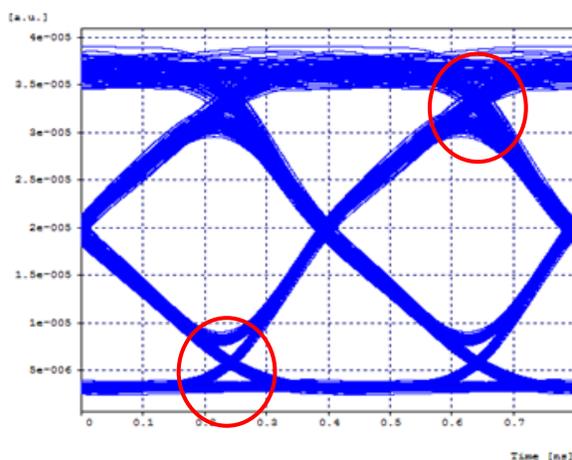
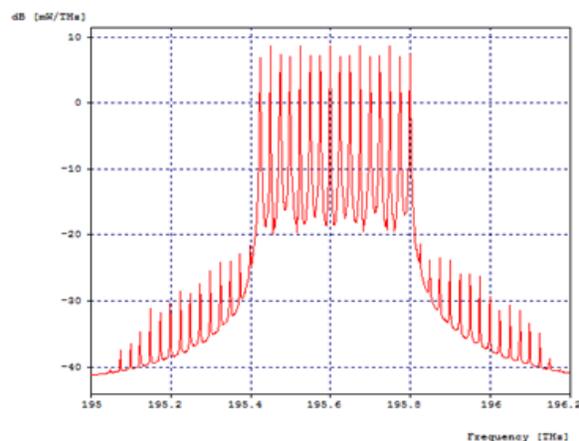


Figura 70. Espectro del Caso de Estudio 2 en Recepción (espaciamento 25GHz).



Al comparar los espectros de entrada y salida del sistema en la Figura 71, se observa que la señal en el receptor se encuentra atenuada comparada con la original, además está afectada también por la FWM porque se generan pulsos nuevos, diferentes a los transmitidos.

La Figura 72, muestra la relación entre el Factor Q y la longitud de la fibra mediante una recta de pendiente casi constante, en la cual se observa que aumentar la longitud del sistema deteriora la calidad del mismo, para este caso en el que los canales están tan próximos entre sí, el factor Q alcanza valores muy bajos comparados con los casos en que los canales son ampliamente espaciados, debido a esto, la función que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación 3.1, no es constante para todos los valores de longitud.

Figura 71. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz).

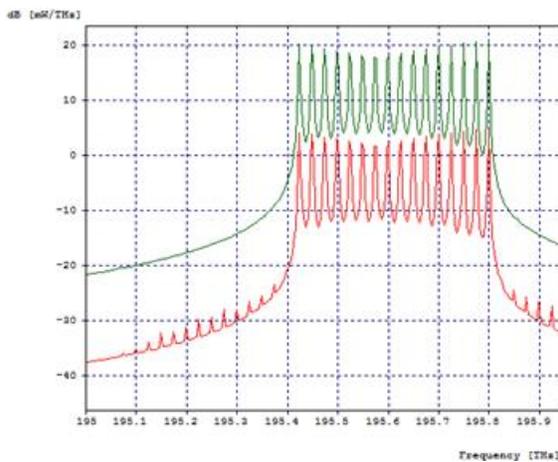
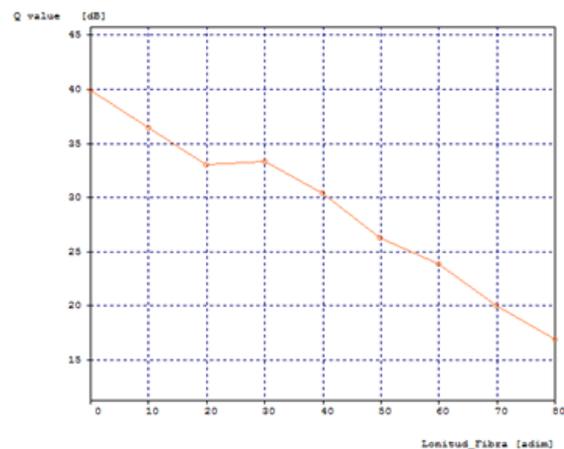


Figura 72. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25 GHz).



La Figura 73, muestra la relación entre la BER y la Longitud de la Fibra, a diferencia de los casos anteriores, la BER no se mantiene constante para todos los valores de longitud, esto se debe a que el Factor Q alcanza valores lo suficientemente bajos para que la función que relaciona estos dos parámetros en la ecuación (3.2) arroje valores variables para la BER, el cual será más alto entre más bajo es el valor del Factor Q.

Las pérdidas y atenuaciones introducidas por la longitud de la fibra se muestran en la Figura 74, donde la potencia en el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 73. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamento 25 GHz).

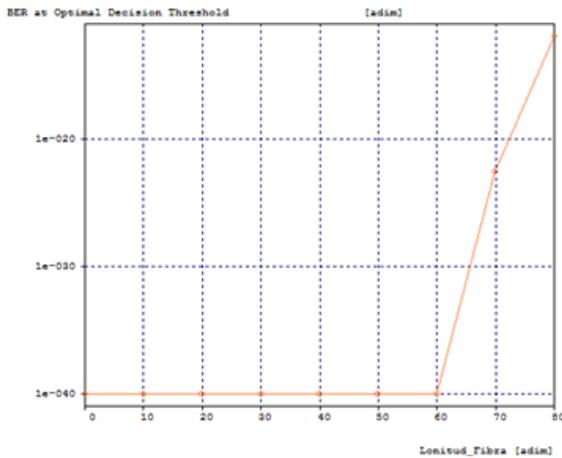
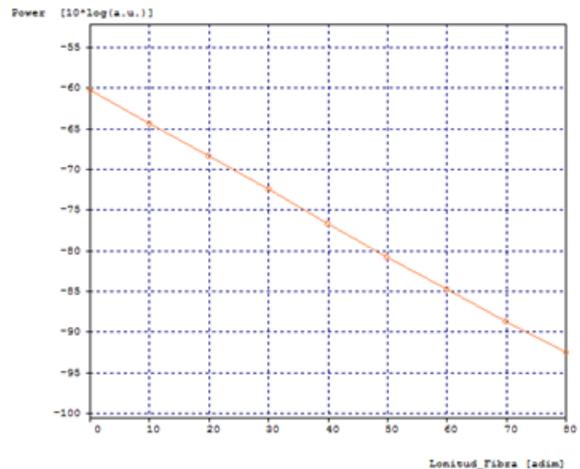


Figura 74. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 2 (Espaciamento 25 GHz).



Con el fin de solucionar los problemas de transmisión observados al simular el sistema planteado para el caso de estudio 2, con 16 canales de 2.5 GHz y espaciamento entre canales de 25 GHz, se procede a implementar en la red de prueba, un módulo de fibra DCF compensando al 100, 75, 50 y 25 % para seleccionar de estos el menor porcentaje de compensación necesario para que los parámetros de calidad de calidad cumplan con los estándares establecidos para la transmisión en una red DWDM. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 17. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz en CASO DE ESTUDIO 2 (Espaciamiento 25GHz) compensado al 100%, 75%, 50% y 25%.

	Canal 195.8 THz Compensado al 100%	Canal 195.8 THz Compensado al 75%	Canal 195.8 THz Compensado al 50%	Canal 195.8 THz Compensado al 25%
Potencia T_X [dBm]	0	0	0	0
Potencia R_X [dBm]	-19.10	-19.11	-19.09	-19.11
Factor Q [dB]	30.24	30.68	29.14	23.75
BER	1e-40	1e-40	1e-40	1e-40
OSNR_{IN} [dB]	13.22	13.22	13.22	13.22
OSNR_{RX} [dB]	13.10	12.84	13.00	12.99

Como se observa en la Tabla 17, compensar al 50% correspondiente a un módulo de fibra DCF de 10.2 Km de longitud, es suficiente para que los parámetros obtenidos de la simulación se aproximen a los obtenidos con canales ampliamente espaciados (100 GHz), a continuación se muestran los datos obtenidos al realizar compensación del 50% en la red de prueba.

- Espaciamiento entre canales de 25 Ghz con Compensación al 50%

Tabla 18. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz (Espaciamiento 25GHz y compensación del 50%) vs Canal 195.8 THz (Espaciados a 100 GHz, sin Compensación)

	Canal 195.8 THz (Espaciados a 25 GHz, Compensado a 50%)	Canal 195.8 THz (Espaciados a 100 GHz, sin Compensación)
Potencia T_X [dBm]	0	0
Potencia R_X [dBm]	-19.09	-19.23
Factor Q [dB]	29.14	25.65
BER	1e-40	1e-40
OSNR_{IN} [dB]	13.22	28.63
OSNR_{RX} [dB]	13.00	28.57

En la Tabla 18, se observa que con dieciséis canales espaciados a 25 GHz en la red de prueba, es necesario compensar al 50% para obtener resultados similares

o cercanos a los obtenidos al simular con un espaciamiento entre canales de 100 GHz sin compensación.

La Figura 75, muestra un diagrama del ojo con menos dispersión en las marcas de unos y ceros, mas simetría en los cruces de tiempo y en la apertura del ojo, es decir que la compensación mitigó los efectos producidos por el ruido y por la CD presentes en los casos en los que no se realizó ningún tipo de compensación, mientras que en la Figura 76, se observa el espectro de la señal en el receptor, en el cual es evidente la presencia de FWM pues se obtienen canales adicionales a los transmitidos, sin embargo estos son de menor amplitud que los obtenidos en los casos en los que no se incluyó compensación.

Figura 75. Diagrama del Ojo para espaciamiento entre canales de 25 GHz compensado al 50% - Caso de Estudio 2.

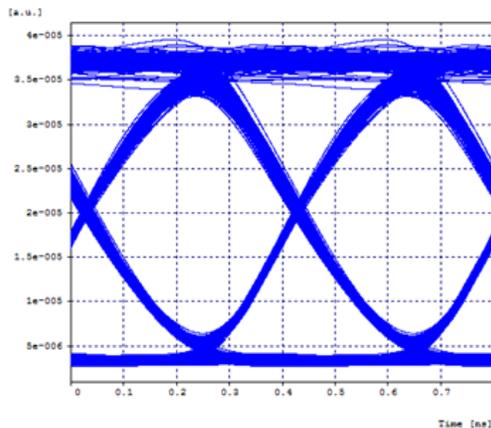
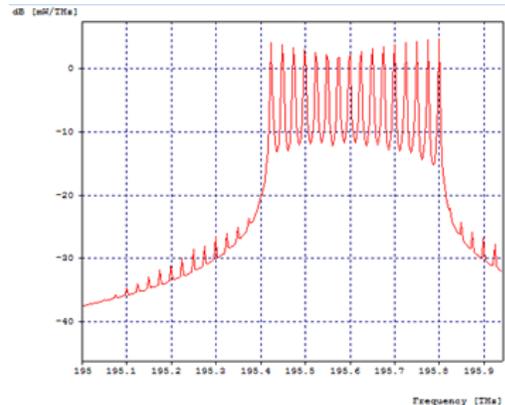


Figura 76. Espectro para espaciamiento entre canales de 25 GHz compensado al 50%- Caso de Estudio 2.



La Figura 77, muestra una superposición de los espectros de entrada y salida del sistema, en él no se observa ensanchamiento ni distorsión de los canales, sin embargo fenómenos como FWM y atenuación siguen estando presentes en el sistema aunque en menor proporción.

Para medir el desempeño del sistema, en la Figura 78, se observa la variación del Factor Q, el cual se comporta inversamente proporcional a la longitud de la fibra, sin embargo para algunos valores de Longitud, la pendiente que describe esta relación sufre algunos cambios, que indican que en dicho punto la calidad del sistema presenta un mejor comportamiento, esto se debe a la relación que existe entre la dispersión cromática, la atenuación, el Factor Q, BER y los efectos de tipo

lineal y no lineal presentes en el sistema, estas relaciones producen mejoras o perdidas logrando que el comportamiento del sistema mejore o empeore.

Figura 77. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 50%)

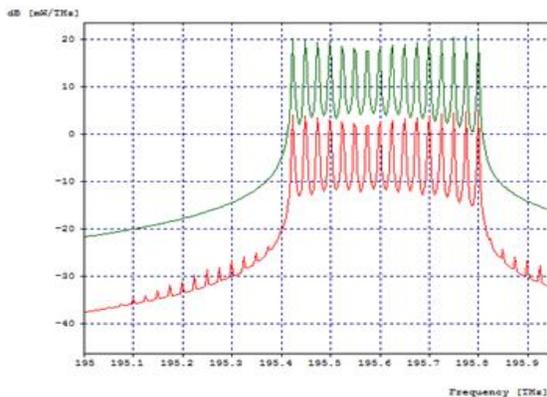
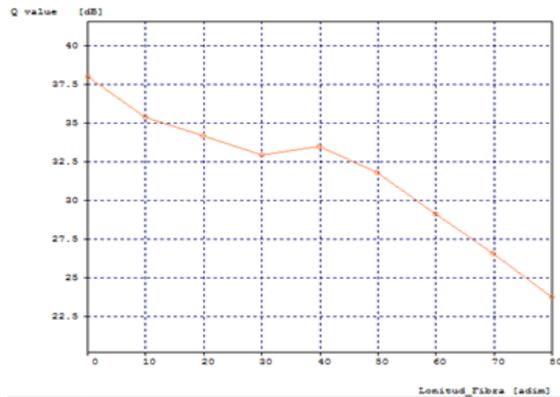


Figura 78. Factor Q vs Longitud de la - Caso de Estudio 2 (Espaciamiento 25GHz y compensación del 50%).



La Figura 79, muestra una relación constante entre la BER, esta se debe a las aproximaciones hechas por la función que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación (3.2), en la cual los valores altos para el factor Q, ocasionan que la función erfc tome el mejor y más probable valor para la $\text{BER} = 1e-40$ y lo asuma como constante.

La potencia en el receptor tiene una relación inversa con la distancia del enlace, debido a las pérdidas y atenuaciones introducidas por la fibra, como se observa en la Figura 80, donde la potencia percibida por el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Para finalizar, es necesario analizar como las variaciones anteriores en la red de prueba, pueden mejorar o no la ISD, para esto se hace uso de las ecuaciones (1.3) y (1.5) planteadas en el capítulo 1, los resultados obtenidos se observan en la Tabla 19.

Tabla 19. Cálculo del ancho de banda del sistema NRZ-OOK para 4 canales de 2.5GHz

Caso de Estudio 2: NRZ-OOK 16 Canales de 2.5 GHz			
Espaciamiento [GHz]	BW por Canal [GHz]	OSNR por Canal [dB]	BW sistema 16 Canales [THz]
100	4	28.57	1.505
50	4	22.52	0.752
25	4	12.88	0.390
25+DCF	4	13.00	0.390

En este caso de estudio se aumentó el número de canales transmitidos a una misma velocidad, disminuyendo el espaciamiento entre ellos para verificar si era posible transmitir igual cantidad de información en un menor ancho de banda, es decir mejorar la ISD del sistema como se muestra en la Tabla anterior, sin embargo, para el caso en el que el espaciamiento entre canales es pequeño (25 GHz), es necesario implementar módulos de fibra compensadora en el sistema de mayor longitud que la implementada en el caso de estudio 1 ya que los efectos como la CD, FWM, Ruido y Atenuación deterioran en gran medida la señal transmitida y necesita ser compensados al 50%.

Por lo tanto, el formato de modulación NRZ-OOK presenta un comportamiento aceptable frente a la ISD, pues es posible transmitir la misma cantidad de información en un menor ancho de banda, cumpliendo con los estándares de calidad objetivo, siempre y cuando el sistema cuente con el porcentaje de compensación necesario para reducir las degradaciones que afectan la transmisión de la señal.

3.3.2 Escenario 2: Formato de modulación RZ-DPSK. Esta forma de modulación digital, donde dos elementos sucesivos de señalización tienen diferente fase, se considera una forma no-coherente de PSK y por ello, en la recepción se evita la necesidad de una señal coherente de referencia para la recuperación de la señal portadora. La implementación del receptor es económica, además de ser capaz de duplicar la capacidad de transmisión sin incurrir en alguna penalización de potencia por efecto de la CD y la PMD por lo que es de amplio uso en telecomunicaciones.

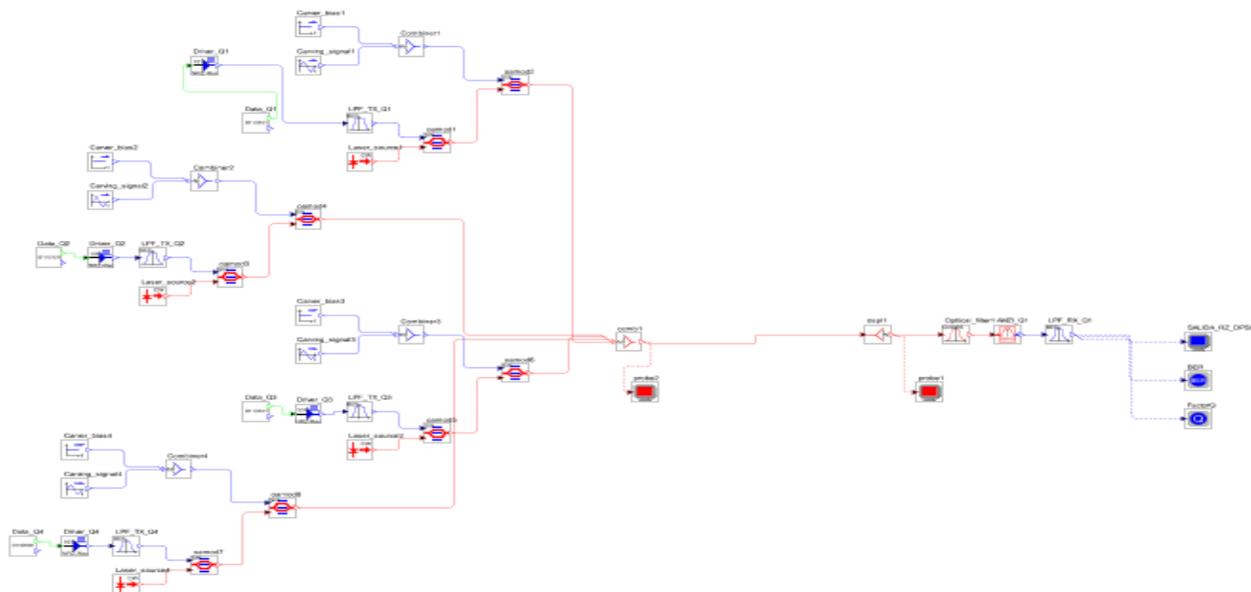
Para generar una señal óptica RZ-DPSK, se usa un modulador de fase electro-óptico el cual genera una señal convencional NRZ-DPSK, para ser modulada por

un pulso tipo carver o MZIM a la misma velocidad de datos, mediante la implementación de otro modulador de intensidad electro-óptico. Los moduladores más convenientemente implementados son los del tipo MZM.

Para definir las λ s a diferentes espaciamientos del canal en un sistema DWDM se hizo uso del estándar G.694 de la ITU-T y la ecuación (3.1)

3.3.2.1 Caso de Estudio 3: Formato de modulación RZ-DPSK con 4 canales a 2.5 GHz. Para este caso de estudio, se realiza el análisis de un sistema DWDM, con un formato de modulación RZ-DPSK, en el que se implementan cuatro ($n=4$) longitudes de onda diferentes obtenidas a partir de la ecuación (3.1), las cuales se transmiten sobre una fibra estándar SSMF-28, a una velocidad de 2.5 Gbps a nivel de acceso, para finalmente obtener 10 Gbps a nivel de transporte. La configuración de este escenario se muestra en la figura 79.

Figura 79. Escenario 2: formato de modulación RZ-DPSK.



En las Figuras 80 y 81, se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación RZ-DPSK, con respecto al diagrama del ojo y el espectro óptico alrededor de los 195.8 THz en un enlace back to back, con el fin

de verificar que el formato de modulación se está implementando correctamente antes de interactuar con el medio.

Figura 80. Diagrama del Ojo del Escenario 2 en Configuración Back to Back.

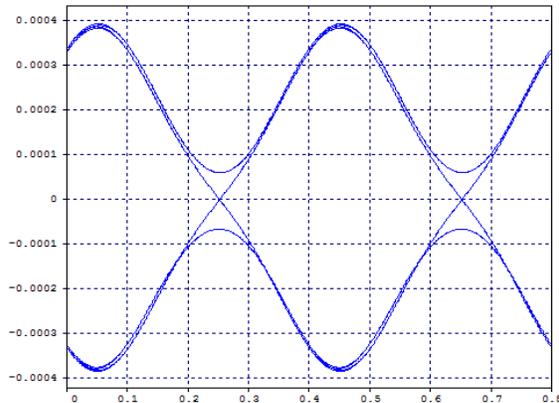
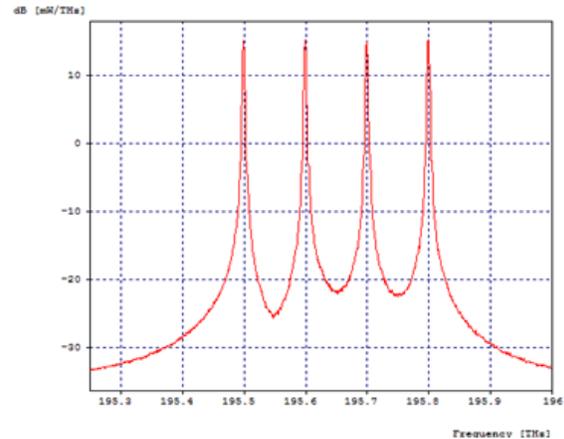


Figura 81. Diagrama del Ojo del Escenario 2 en Configuración Back to Back.



Una vez se obtienen las señales moduladas correctamente, se introduce la fibra SMF-28, se fija la velocidad de transmisión correspondiente a cada caso de estudio y se definen los parámetros fijos que arrojan mejores resultados en el sistema los cuales van a servir de comparación con respecto a otros casos de estudio.

Tabla 20. Parámetros Fijos del Sistema-Escenario 2

Potencia Laser	0 dBm
Longitud de la Fibra	80 Km
Dispersión Cromática	17 ps/nm/Km
Atenuación	0.2 dB/Km

- Espaciamiento entre Canales de 100 GHz.: para este caso de estudio se configuran 4 canales (195.5, 195.6, 195.7 y 195.8 THz) espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del formato de

modulación en la red de prueba. Los datos obtenidos al simular el caso de estudio 3 bajo esta condición de espaciamento se muestran a continuación.

Tabla 21. Datos de Simulación para 4 canales en el caso de estudio 3 (Espaciamento 100GHz).

	Canal 195.8 THz
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-25.34
Factor Q [dB]	32.09
BER	1e-40
OSNR_{IN}	30.38
OSNR_{RX}	30.33

En la Figura 82, se observa el diagrama del ojo típico de la modulación DPSK para el canal 195.8 THz, el cual presenta total simetría en la apertura del ojo y en los cruces de tiempo, es decir que no hay presencia de PMD, CD ni ensanchamiento de los pulsos; en las marcas de ceros y unos se evidencia un poco de dispersión de los datos pero esta no es de consideración ya que este tipo de formato multinivel es robusto frente a la mayoría de limitaciones ópticas que presento el formato NRZ-OOK. La Figura 83, muestra el espectro de salida del sistema, en él se observan los 4 canales transmitidos inicialmente con presencia moderada de FWM, pues los canales adicionales que se presentan son de baja amplitud.

Figura 82. Diagrama del Ojo del Caso de Estudio 3 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).

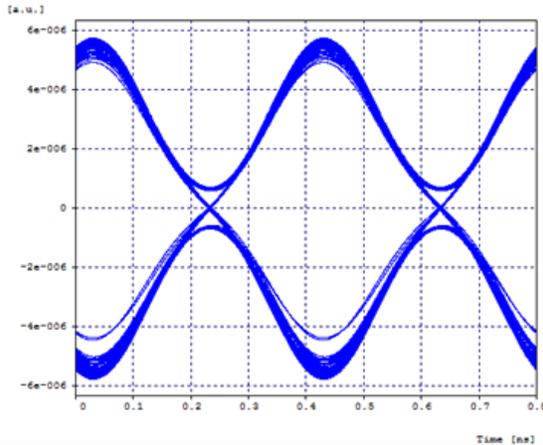
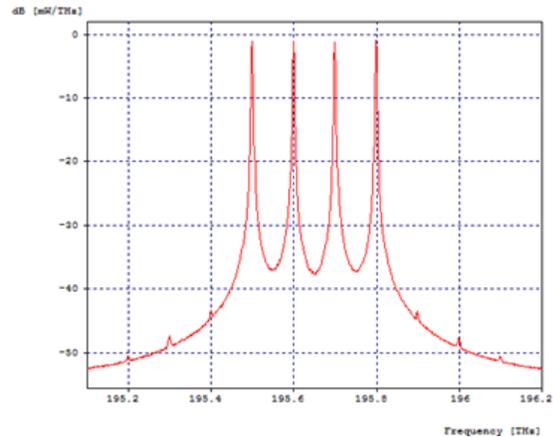


Figura 83. Espectro del Caso de Estudio 3 en Recepción (Espaciamiento 100GHz).



La Figura 84, muestra el espectro de entrada (Verde) y de salida (Rojo) del sistema, en el cual se observa que no hay ensanchamiento de los canales, es decir que no hay presencia de SPM y tampoco de XPM pues los pulsos en el receptor no sufren ningún tipo de distorsión, solo se ven un poco afectados por la atenuación introducida por la fibra y por la FWM, ya que en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, aunque estos sean de amplitud casi nula.

En la Figura 85, se observa la degradación del Factor Q con respecto a la longitud de la fibra, sin embargo, para ciertas distancias, este Factor parece mejorar y en otras presenta unas caídas de pendiente, esto debido a las múltiples interacciones de diversos efectos lineales y no lineales y más directamente de la relación que existe entre el factor Q y la OSNR del sistema.

Figura 84. Espectro óptico de entrada (Rojo) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (Verdad) - Caso de Estudio 3.

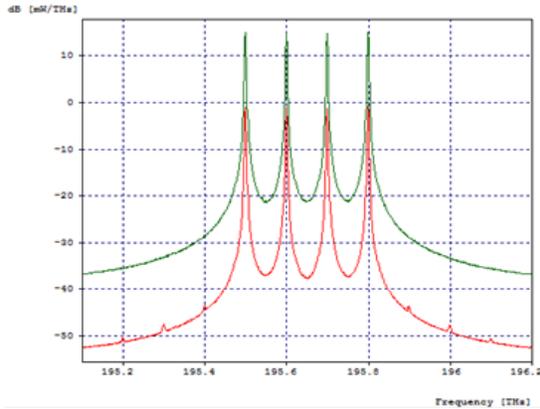
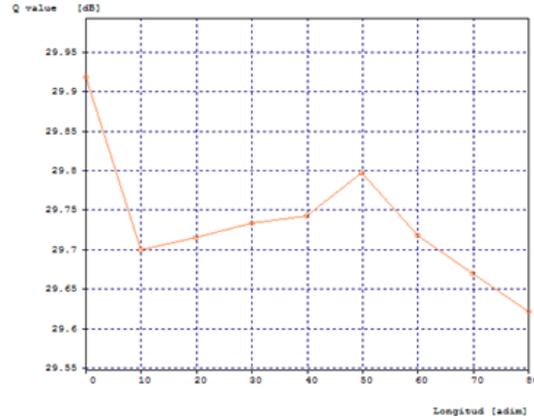


Figura 85. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 3.



La variación del factor Q con respecto a la distancia, ocasiona la variación de la BER con respecto a la misma, sin embargo, la Figura 86, muestra un comportamiento constante de la BER con respecto a la variación de la longitud de la fibra, esto se debe a que la función que relaciona estas dos variables erfc, es una aproximación como se mencionó anteriormente, por lo tanto al obtener valores altos para el factor Q, la función toma el mejor y más probable valor para la BER, en este caso $1e-40$ y lo asume como constante [47].

La Figura 87, muestra el comportamiento lógico de la potencia con relación a la longitud de la fibra, puesto que entre más fibra se tenga en el enlace, se introduce más atenuación y pérdidas en el mismo, por lo tanto a pesar de tener una potencia constante en la transmisión, esta decrece de manera lineal en cuanto la longitud del enlace es mayor.

Figura 86. BER vs Longitud de la Fibra para el Caso de Estudio 3.

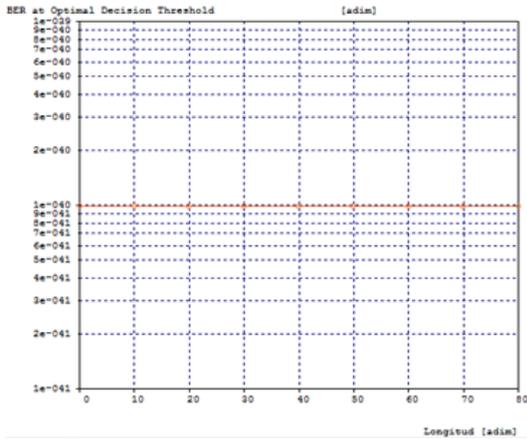
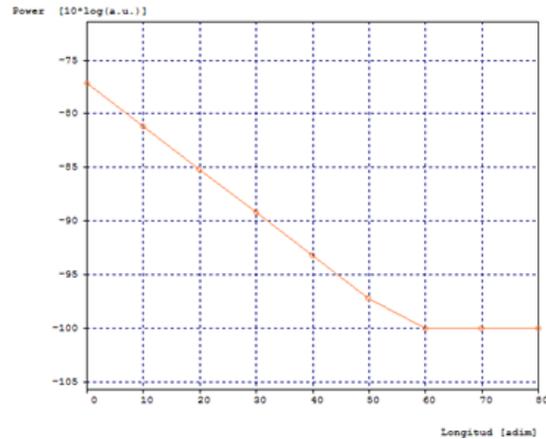


Figura 87. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra para el Caso de Estudio 3.



- Espaciamiento entre Canales 50 GHz: Una vez realizado el análisis para la red con canales ampliamente espaciados (100 GHz), se procede de la misma forma que en el caso de estudio 1, disminuyendo el espaciamiento entre canales para determinar la dependencia del mismo con el funcionamiento óptimo del sistema. Los datos obtenidos de esta simulación se muestran a continuación.

Tabla 22. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz en el Escenario 2 - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 50GHz).

Canal 195.8 THz	
Potencia T_X [dBm]	0
Potencia R_X [dBm]	-25.33
Factor Q [dB]	31.97
BER	1e-40
OSNR _{IN} [dB]	24.26
OSNR _{RX} [dB]	24.39

En la Figura 88, se observa el diagrama del ojo para el canal 195.8 THz, el cual es igual que para el caso en el que los canales se encuentran ampliamente espaciados, presenta total simetría en la apertura del ojo y en los cruces de tiempo, por lo tanto no hay presencia de PMD, CD, ni ensanchamiento de los pulsos en el sistema; sin embargo, en las marcas de ceros y unos se evidencia un poco de dispersión de los datos, es decir que el sistema se ve levemente afectado por el ruido. La Figura 89, muestra el espectro de la señal en el receptor, en él se observan los 4 canales transmitidos inicialmente con moderada presencia de FWM, pues los canales adicionales que se evidencian tienen muy poca amplitud.

Figura 88. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 50GHz).

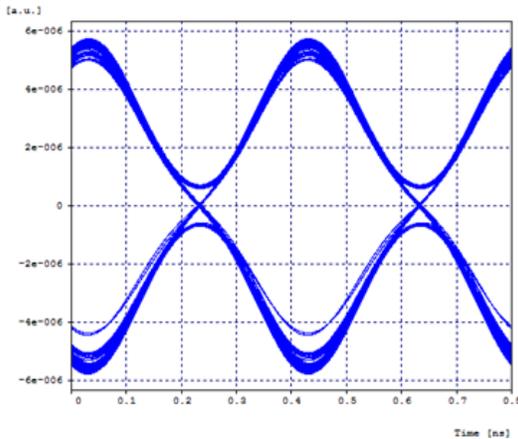
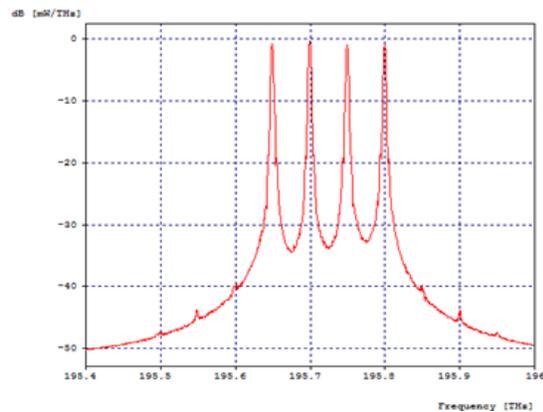


Figura 89. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 50GHz).



La Figura 90, muestra el espectro de entrada (verde) y de salida (Rojo) del sistema, en el cual se observa que no hay ensanchamiento de los canales, es decir que no hay presencia de SPM y tampoco de XPM pues los pulsos en el receptor no sufren ningún tipo de distorsión, solo se ven un poco afectados por la atenuación introducida por la fibra, tampoco se observan efectos no lineales que estén deteriorando el rendimiento de la red, sin embargo, automáticamente al disminuir el espaciamiento entre canales a la mitad, el ancho de banda usado por la señal también se reduce lo cual indica que se está transmitiendo la misma cantidad de información en un menos ancho de banda, es decir que se logra mejorar la ISD para el sistema.

Con respecto al Factor Q, en la Figura 91, se observa como este se degrada a medida que la longitud de la fibra aumenta, sin embargo, para ciertas distancias, la relación parece mejorar y en otras presenta unas caídas de pendiente, esto debido a las múltiples fluctuaciones de efectos lineales y no lineales presentes en la transmisión y la relación de estos con la OSNR del sistema y por lo tanto con el Factor Q.

Figura 90. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.

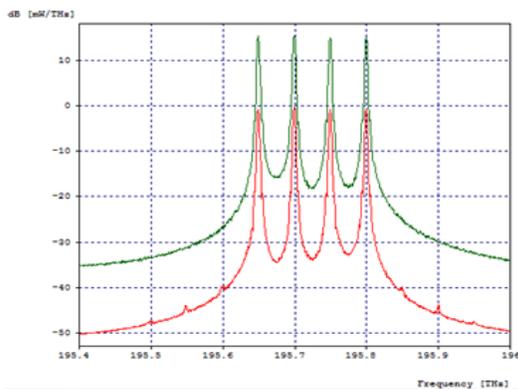
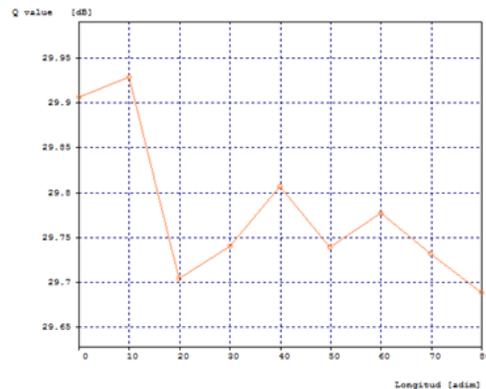


Figura 91. Factor Q vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.



La Figura 92 muestra un comportamiento constante de la BER con respecto a la variación de la longitud de la fibra, lo cual no es correcto pues la BER debe variar con relación a la variación del factor Q, sin embargo, esto se debe a las aproximaciones hechas por la función que relaciona estas dos variables (complementary error function), donde al obtener valores altos para el factor Q, la función toma el mejor y más probable valor para la BER, en este caso $1e-40$ y lo asume como constante [47].

La Figura 93, muestra la variación de la potencia con relación a la longitud de la fibra, entre más fibra se tenga en el enlace, se introduce más atenuación y pérdidas en el mismo, por lo tanto a pesar de tener una potencia constante en la transmisión, esta decrece de manera lineal en cuanto la longitud del enlace es mayor.

Figura 92. BER vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.

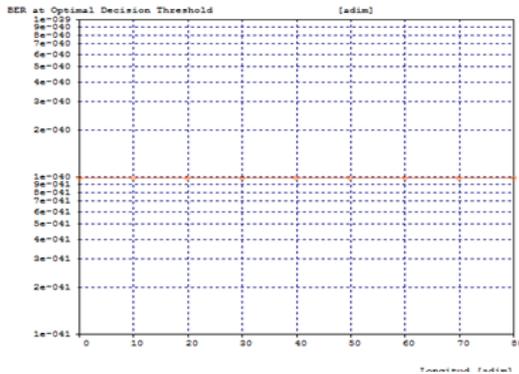
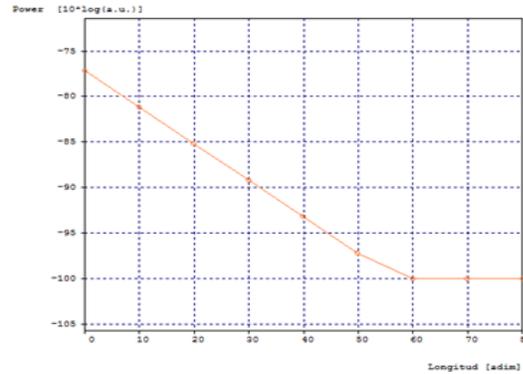


Figura 93. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 3.



- Espaciamiento entre Canales de 25 GHz: A continuación se prueba el desempeño de la red, disminuyendo el espaciamiento entre canales a 25GHz, con el fin de transmitir el mismo volumen de información de los casos anteriores pero en un cuarto del ancho de banda inicial, los datos obtenidos de esta simulación para el canal de prueba se muestran a continuación.

Tabla 23. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-25.31
Factor Q [dB]	31.81
BER	1e-40
OSNR _{IN} [dB]	17.29
OSNR _{RX} [dB]	17.38

A pesar de que los canales transmitidos se encuentran próximos entre sí, el sistema cumple con los estándares de calidad propuestos en este trabajo de grado (BER=1e-15 y Factor Q=20) estimados para este tipo de red [59], sin embargo, al realizar el análisis del diagrama del ojo y espectro obtenidos de la herramienta de simulación, la presencia de efectos lineales y no lineales se hace más evidente comparada con los casos anteriores donde el espaciamiento entre canales era mayor.

En la Figura 94, se observa el diagrama del ojo para el canal de 195.8 THz, en él es evidente la presencia de dispersión de datos en la marca de los unos y de los ceros, lo cual indica que el sistema se está siendo afectado por el ruido pero no en gran medida, en la apertura del ojo se observa que hay simetría en los cruces de tiempo y que estos no se encuentran desplazados, es decir que no hay presencia de CD ni PMD a pesar de la cercanía entre canales, en la Figura 95, que corresponde al espectro de la señal en el receptor, se muestra cómo al reducir el espaciamiento entre canales, se reduce el ancho de banda ocupado para la transmisión de la señal, lo cual genera la aparición de pequeños canales adicionales introducidos por la FWM o mezcla de cuatro ondas, sin embargo, estos no cuentan con la potencia suficiente para convertirse en un problema en la transmisión.

Figura 94. Diagrama del en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).

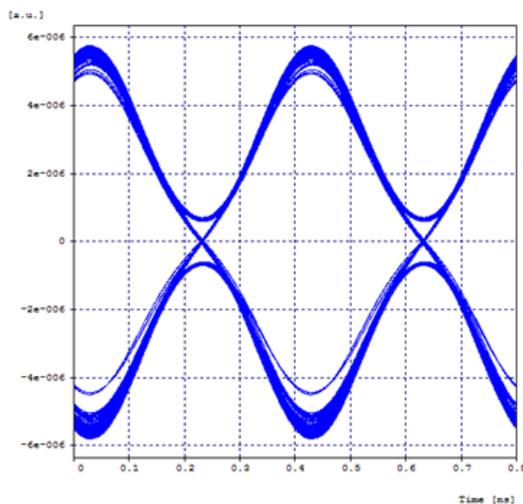
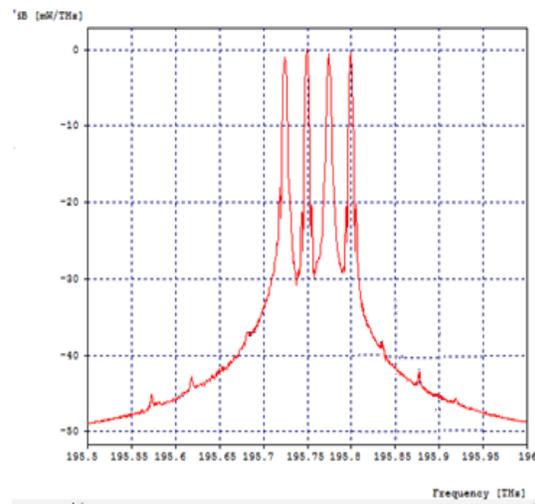


Figura 95. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).



Al superponer los espectros de entrada y de salida como se muestra en la Figura 96, se observa que los canales no sufren ningún tipo de ensanchamiento ni distorsión, es decir que el sistema no está siendo afectado por fenómenos como la SPM y la XPM, sin embargo, si se generan de canales adicionales que hacen evidente la presencia de FWM en la señal obtenida en el receptor a pesar de que estos no son de gran amplitud, también se observa que la señal de salida del sistema presenta menores niveles de potencia con respecto a la señal transmitida, esto debido a la atenuación intrínseca introducida por la fibra que es de (2dB/km) y a los demás elementos que componen la red.

La variación del Factor Q con respecto a la longitud de la fibra, sigue una relación inversa, es decir que al aumentar la longitud de la fibra, el Factor Q disminuye, sin embargo, como se observa en la Figura 97, para ciertas distancias, este Factor parece mejorar y en otras presenta unas caídas de pendiente, esto debido a las múltiples interacciones de efectos tanto lineales como no lineales con la señal transmitida, que influyen en las fluctuaciones de la OSNR y por lo tanto en las variaciones del Factor Q.

Figura 96. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).

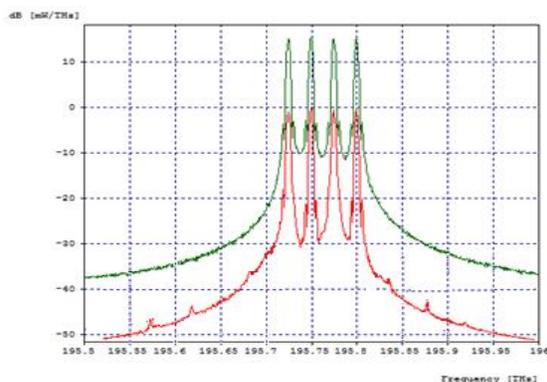
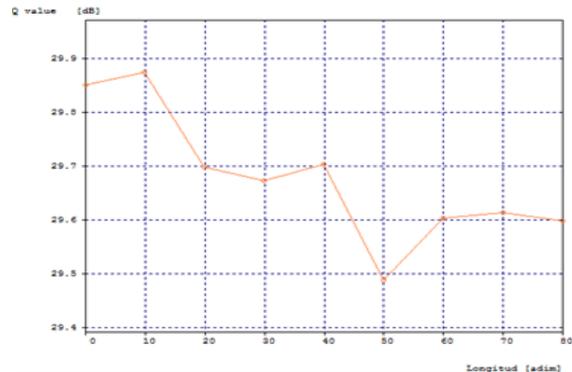


Figura 97. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).



La Figura 98, muestra la relación entre la BER y la Longitud de la Fibra, en ella, la BER se mantiene constante para todos los valores de longitud, esto se debe a que el Factor Q no alcanza valores lo suficientemente bajos para que la función que relaciona estos dos parámetros en la ecuación (3.2) arroje valores variables para la BER, y por lo tanto asigna al resultado el mejor y más probable valor de BER que es $1e-40$ y lo asume como constante.

Las pérdidas y atenuaciones introducidas por la longitud de la fibra se muestran en la Figura 99, donde la potencia en el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 98. BER vs Longitud de la - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).

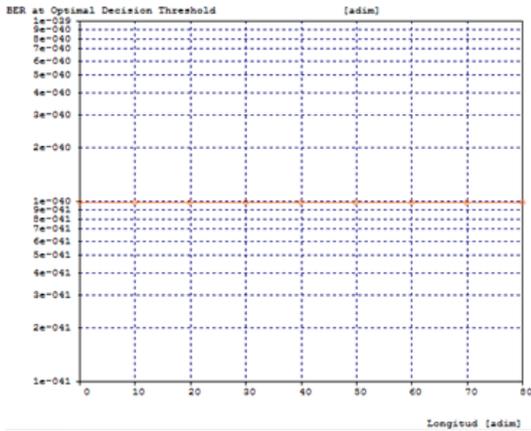
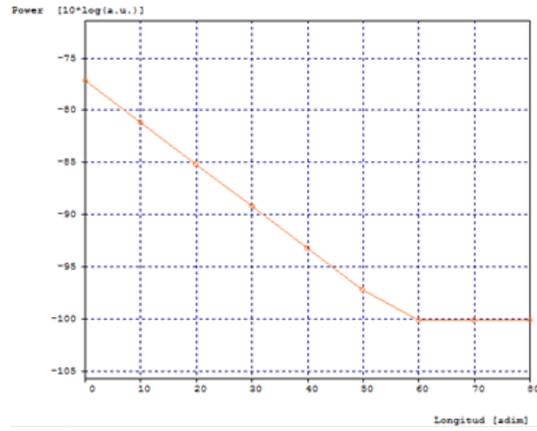


Figura 99. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 3 (Espaciamiento 25GHz).



Como se pudo observar durante el desarrollo de este caso de estudio, el formato de modulación RZ-DPSK es mucho más robusto frente a las degradaciones lineales y no lineales comparado con el formato RZ-OOK, ya que es posible reducir el espaciamiento de canales a 25 GHz sin necesidad de compensar y el sistema sigue funcionando satisfactoriamente para la transmisión de 4 canales a 2.5 GHz.

Para finalizar el caso de estudio 3, es necesario analizar como las variaciones anteriores en la red de prueba, pueden mejorar o no la ISD, para esto se hace uso de las ecuaciones (1.3) y (1.5) planteadas en el capítulo 1, los resultados obtenidos se observan a continuación.

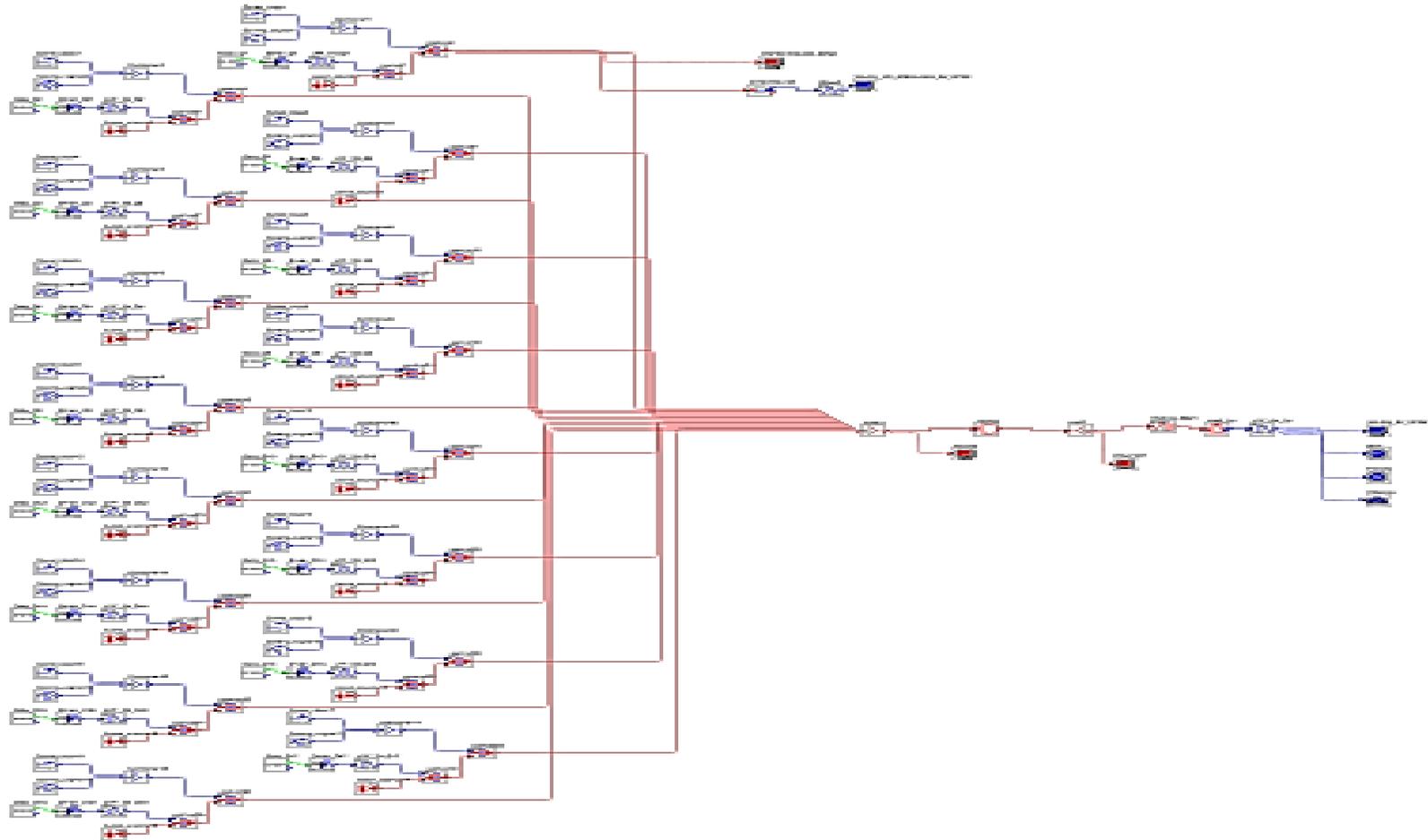
Tabla 24. Cálculo del ancho de banda del sistema RZ-DPSK para 4 canales de 2.5GHz.

Caso de Estudio 3: RZ-DPSK 4 Canales de 2.5 GHz			
Espaciamiento [GHz]	BW por Canal [GHz]	OSNR por Canal [dB]	BW sistema [THz]
100	8	30.33	0.308
50	8	24.39	0.154
25	8	17.38	0.077

Al cambiar el formato de modulación de la red de NRZ-OOK a RZ-DPSK, se observa como automáticamente el sistema se vuelve más robusto frente a las degradaciones ópticas ocasionadas por la presencia de efectos tanto lineales como no lineales, permitiendo de esta manera reducir el espaciamiento entre canales y por lo tanto también el ancho de banda ocupado por el sistema, sin que la señal se dañe en el receptor y sin necesidad de compensación a pesar de que RZ-DPSK maneje un espectro por canal más ancho que el de NRZ-OOK. Teniendo en cuenta la definición de ISD planteada en el capítulo 1 y los datos obtenidos en la Tabla 24, se concluye que RZ-DPSK se comporta mejor que NRZ-OOK en cuanto a la ISD, ya que es posible transmitir la misma cantidad de información a una velocidad fija, en un menor ancho de banda sin necesidad de implementar módulos de compensación de fibra DCF.

3.3.2.2 Caso de Estudio 4: Formato de modulación RZ-DPSK, Velocidad de 40 Gbps en 16 Longitudes de Onda de 2.5 Gbps. Para este caso de estudio, se realiza el análisis de un sistema DWDM, con un formato de modulación RZ-DPSK, en el que se implementan diez y seis longitudes de onda diferentes, cuales se transmiten sobre una fibra estándar SSMF-28, a una velocidad de 2.5 Gbps a nivel de acceso, para finalmente obtener 40 Gbps a nivel de transporte. La configuración de este escenario se muestra.

Figura 100. Caso de Estudio 4: Formato de modulación RZ-DPSK, Velocidad de 10 Gbps en 16 Longitudes de Onda de 2.5Gbps



En la Figura 101 y 102, se aprecian las condiciones iniciales de funcionamiento del formato de modulación RZ-DPSK, con respecto al diagrama del ojo y el espectro óptico alrededor de los 195.8 THz en un enlace back to back, con el fin de verificar que el formato de modulación se está implementando correctamente antes de interactuar con el medio.

Figura 101. Diagrama del Ojo en Configuración Back to Back alrededor de los 195.8 THz

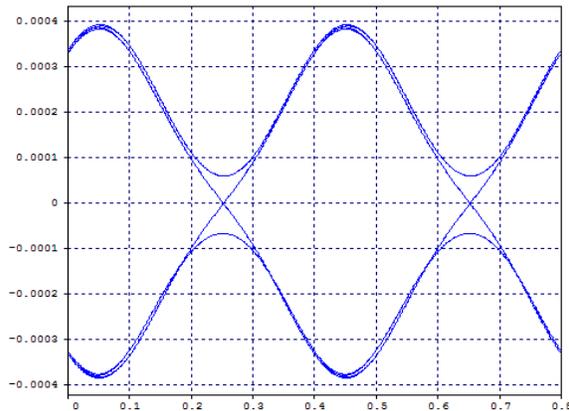
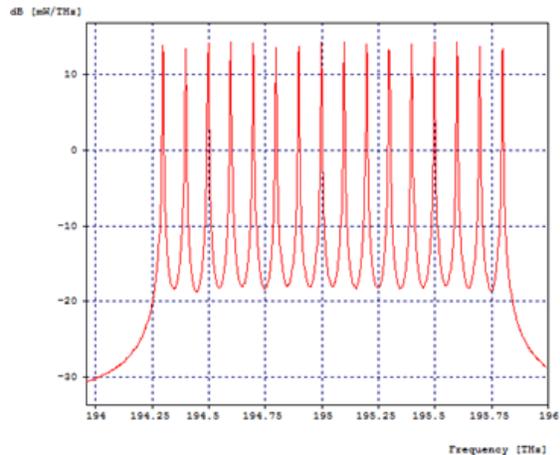


Figura 102. Espectro Óptico en Configuración Back to Back alrededor de los 195.8 THz,



- Espaciamiento entre Canales de 100 GHz: Para este caso de estudio se configuran diez y seis canales espaciados entre sí por 100 GHz, con el fin de determinar el comportamiento del formato de modulación en la red de prueba. Los datos obtenidos al simular el caso de estudio 4 bajo esta condición de espaciamiento se muestran a continuación.

Tabla 25. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 100 GHz).

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-25.59
Factor Q [dB]	29.68
BER	1e-40
OSNR IN [dB]	30.17
OSNR R_x [dB]	26.94

Al igual que en el Escenario 1, dado que el comportamiento de los diferentes canales a frecuencias próximas se analiza sobre el mismo medio de transmisión y las características de este no van a cambiar en el tiempo ni por efectos de temperatura o potencia, se analizara el comportamiento de solo uno de los canales transmitidos (195.8 THz).

En la Figura 103, se observa el diagrama del ojo para el canal 195.8 THz, este diagrama muestra una dispersión casi nula en sus marcas de unos y ceros, es decir que la señal no es afectada por el ruido del sistema, también muestra una apertura del ojo totalmente simétrica al igual que sus cruces de tiempo los cuales no se encuentran desplazados, por lo tanto, se puede decir que la red de prueba bajo estas condiciones de espaciamento y para el formato de modulación empleado, es inmune a degradaciones ópticas como la CD, PMD y Ruido. Sin embargo en la Figura 104., se tiene el espectro de la señal en el receptor, en ella se observan los diez y seis canales transmitidos además de pequeños canales adicionales, como producto del efecto FWM o mezcla de cuatro ondas que si esta presente en la señal debido al aumento de los canales transmitidos y la cercanía entre ellos, esto quiere decir que en algún momento, las señales transmitidas entran en coincidencia de fase.

Figura 103. Diagrama del Ojo en Recepción - Caso de Estudio 4 (Espaciamento 100 GHz).

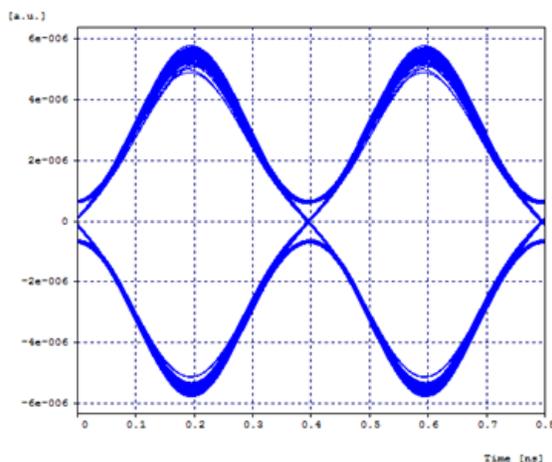
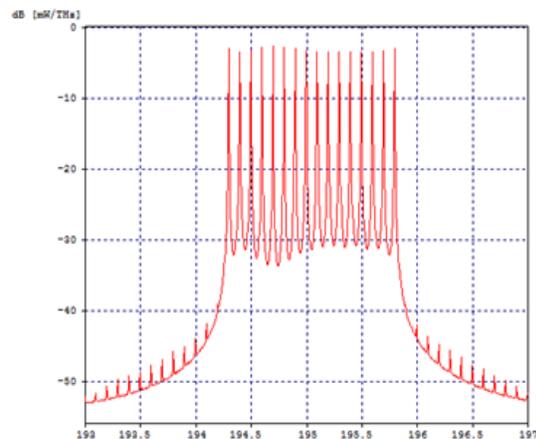


Figura 104. Espectro en Recepción - Caso de Estudio 4 (Espaciamento 100 GHz).



La Figura 105, compara los espectros de entrada y de salida del sistema, en ella se observa que la señal que se obtiene en el receptor esta atenuada pero sus

pulsos no sufren ningún ensanchamiento, también se observa presencia de FWM, al generarse pulsos adicionales a los transmitidos originalmente.

En la Figura 106, se muestra la variación del Factor Q con respecto a la longitud de la fibra, en la cual al aumentar la longitud de la fibra, el Factor Q disminuye, sin embargo, para ciertas distancias, el sistema presenta unas leves mejoras, esto debido a las múltiples interacciones de efectos tanto lineales como no lineales con la señal transmitida, que influyen en las fluctuaciones de la OSNR y por lo tanto en las variaciones del Factor Q.

Figura 105. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) (Espaciamiento 100GHz) - Caso de Estudio 4.

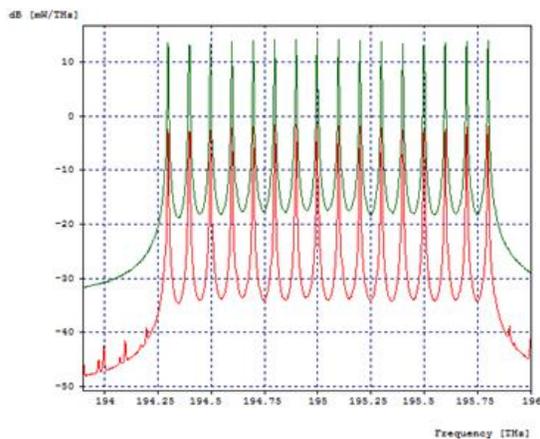
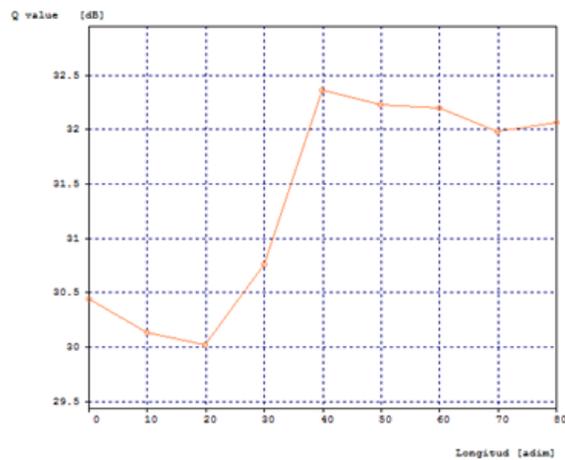


Figura 106. Factor Q vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 100GHz- Caso de Estudio 4.



La Figura 107, muestra una relación constante entre la BER y la longitud de la fibra, debida a las aproximaciones hechas por la erfc que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación (3.2), en este caso, los valores altos para el factor Q, ocasionan que la función erfc tome el mejor y más probable valor para la BER = $1e-40$ y lo asuma como constante.

La potencia en el receptor tiene una relación inversa con la distancia del enlace, ya que la fibra y algunos equipos introducen pérdidas y atenuaciones, como se observa en la Figura 108, donde la potencia percibida por el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 107. BER vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 100GHz) - Caso de Estudio 4.

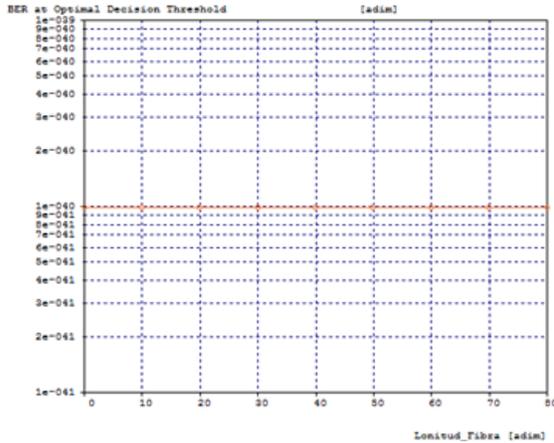
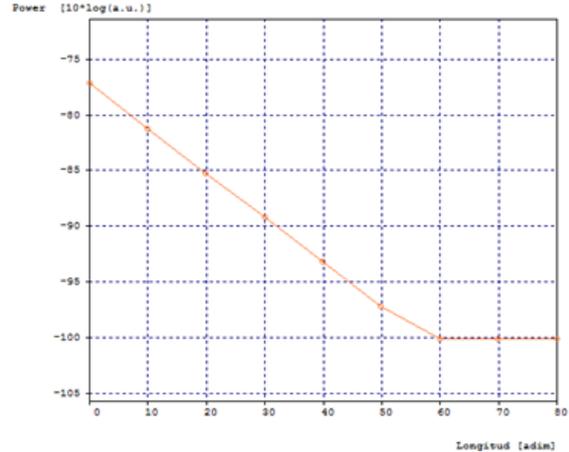


Figura 108. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 25GHz y compensación del 100%) - Caso de Estudio 4.



- Espaciamiento entre Canales de 50 GHz: A continuación se procede a disminuir este espaciamiento entre canales hasta 50 GHz para determinar la dependencia del mismo con el funcionamiento óptimo del sistema y comprobar que se puede transmitir la misma cantidad de información en la mitad del ancho de banda. Los datos obtenidos de esta simulación se muestran a continuación.

Tabla 26. Datos de Simulación - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 50 GHz)

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-25.72
Factor Q [dB]	29.59
BER	1e-40
OSNR IN [dB]	23.15
OSNR R_x [dB]	19.82

La Figura 109, muestra un diagrama del ojo un poco más afectado por el ruido comparado con el caso en el que los canales se encuentran ampliamente espaciados, como observar en la dispersión que se presenta en la marca de los unos y ceros, sin embargo el cruce de tiempo y la apertura del ojo se mantienen

simétrico y no están desplazados en el tiempo, lo cual indica que la CD y la PMD aún no son considerables para el desempeño del sistema.

La Figura 110, muestra el espectro de la señal en el receptor, se evidencian claramente los diez y seis canales transmitidos en un menor ancho de banda que el original, además junto al espectro se observan algunos tonos adicionales que se producen debido a la reducción del espaciado entre canales, el aumento del Número de canales transmitido y la dispersión de la fibra implementada.

Figura 109. Diagrama del Ojo para el canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 50 GHz).

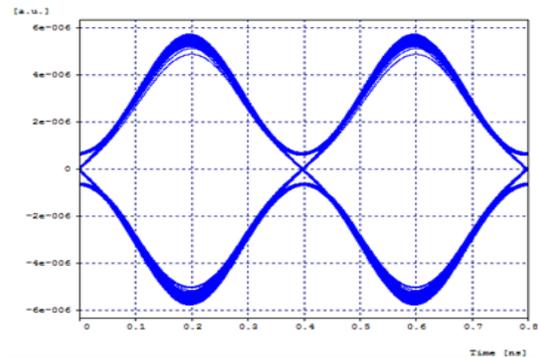
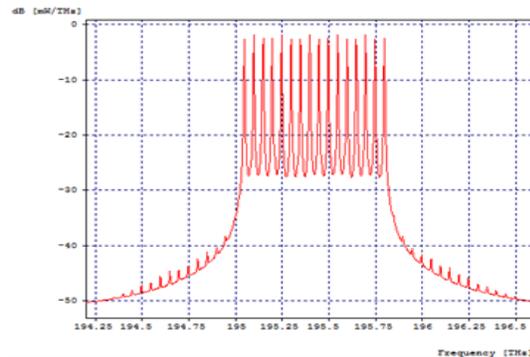


Figura 110. Espectro Óptico en Configuración para el canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 50 GHz).



La Figura 111, muestra el espectro de entrada y de salida del sistema, en el cual se observa que no hay ensanchamiento de los canales, es decir que no hay presencia de SPM y tampoco de XPM pues los pulsos en el receptor no sufren ningún tipo de distorsión, solo se ven afectados por la atenuación introducida por la fibra, sin embargo un efecto no lineal que si se hace evidente en este caso es la FWM, ya que en el espectro de salida se generan pulsos diferentes a los transmitidos, los cuales pueden llegar a coincidir con algún canal original produciendo distorsión o pérdida de la información.

Como se observa en la Figura 112, la curva que relaciona el Factor Q con la longitud de la fibra cambia de pendiente constantemente, es decir que el factor Q para algunas distancias tiende a mejorar y para otras a empeorar, esto se debe a las múltiples interacciones de diversos efectos lineales y no lineales y más directamente de la relación que existe entre el factor Q y la OSNR del sistema.

Figura 111. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 4.

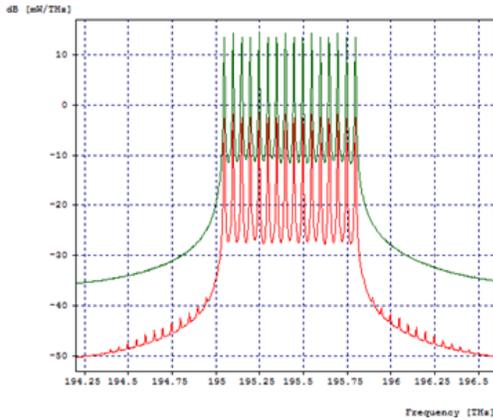
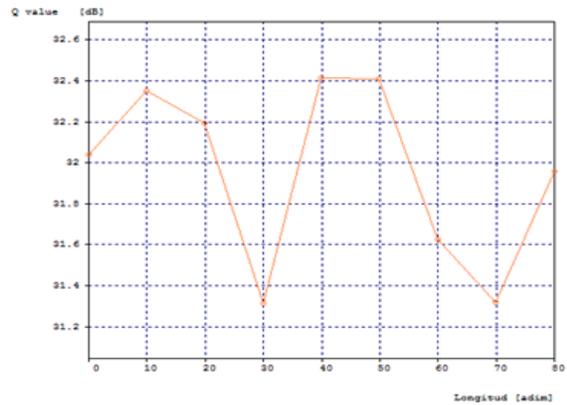


Figura 112. Factor Q vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50GHz) - Caso de Estudio 4.



La Figura 113, muestra una relación constante entre la BER y la longitud de la fibra, la cual como se explicó anteriormente, se debe a las aproximaciones hechas por la función que relaciona a la BER con el Factor Q en la ecuación (3.2), en este caso, los valores altos para el factor Q, ocasionan que la función erfc tome el mejor y más probable valor para la BER = $1e-40$ y lo asuma como constante.

La potencia en el receptor tiene una relación inversa con la distancia del enlace, debido a las pérdidas y atenuaciones introducidas por el mismo, como se observa en la Figura 114, donde la potencia percibida por el receptor, disminuye a medida que la longitud del enlace aumenta.

Figura 113. BER vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50 GHz) - Caso de Estudio 4.

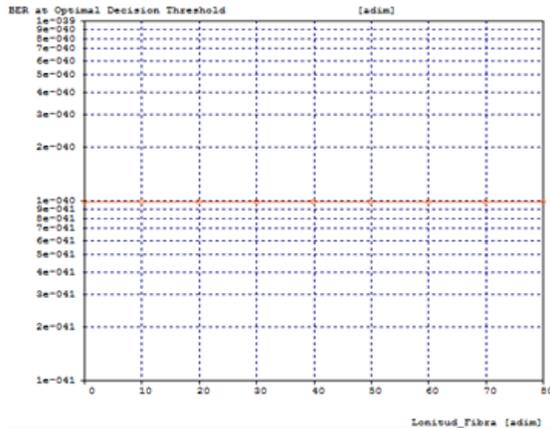
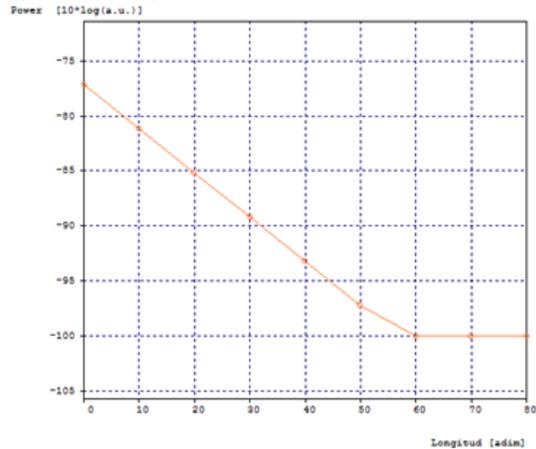


Figura 114. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra (Espaciamiento 50 GHz) – Caso de Estudio 4.



- Espaciamiento entre Canales de 25 GHz: Finalmente se disminuye el espaciamiento entre canales a 25GHz, con el fin de transmitir la misma cantidad de información inicial en un menor ancho de banda, los datos obtenidos de esta simulación para el canal de prueba se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Datos de Simulación para el CH 195.8 THz en el - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz)

Canal 195.8 THz	
Potencia T_x [dBm]	0
Potencia R_x [dBm]	-25.68
Factor Q [dB]	29.53
BER	1e-40
OSNR _{IN} [dB]	6.85
OSNR _{RX} [dB]	7.02

En la Figura 115, se muestra el diagrama del ojo para el canal 195.8 THz en el cual se aprecia simetría total en los cruces de tiempo y en la apertura del ojo, así como también un nivel mínimo de dispersión de datos en las marcas de unos y ceros, es decir que en este caso en el que los canales se encuentran muy

próximos entre sí, el sistema sigue funcionando sin verse afectado por degradaciones ópticas como la CD, PMD y el ruido, sin embargo en la Figura 116 se observa que la señal en el receptor ha sido atenuada considerablemente y que el piso de ruido también ha aumentado, además se presentan canales adicionales a los transmitidos, por lo tanto la FWM se hace evidente en el sistema al aumentar el número de canales en el sistema y reducir el espaciado entre ellos.

Figura 115. Diagrama del Ojo para el Canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).

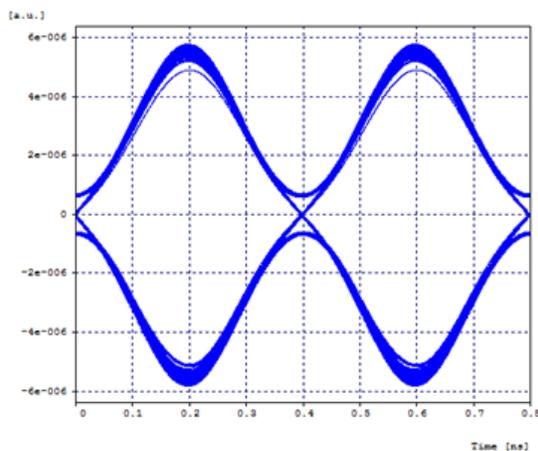
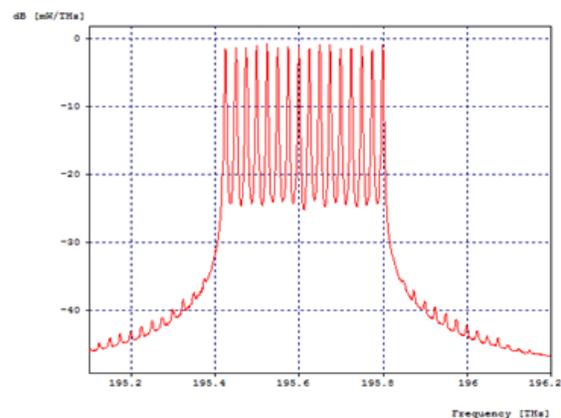


Figura 116. Espectro Óptico en para el Canal 195.8 THz - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).



Al comparar los espectros de entrada y salida del sistema en la Figura 117, se observa que la señal en el receptor se encuentra atenuada comparada con la original, además está afectada también por la FWM porque se generan pulsos diferentes a los transmitidos inicialmente.

La Figura 118, muestra la relación entre el Factor Q y la longitud de la fibra, la cual para ciertas distancias tiende a mejorar y para otras a empeorar, debido a la interacción de diversos efectos lineales y no lineales con la señal y más directamente a la relación que existe entre el factor Q y la OSNR del sistema.

Figura 117. Espectro óptico de entrada (verde) vs Espectro óptico de Salida del Sistema (rojo) - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).

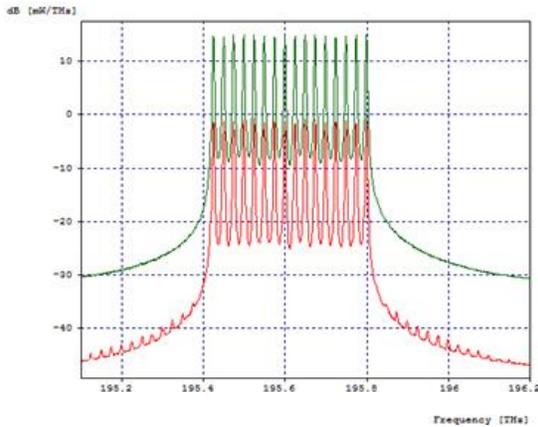
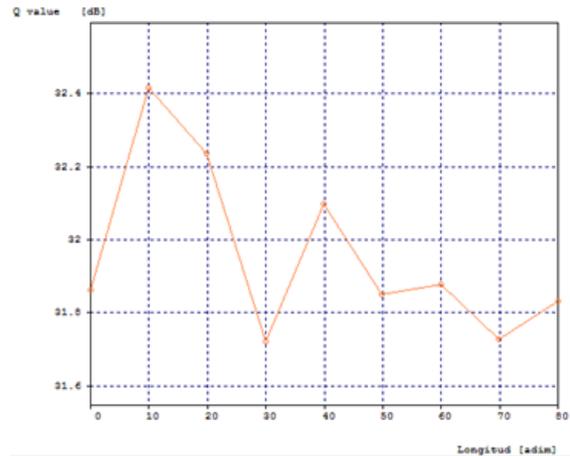


Figura 118. Factor Q vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).



La Figura 119 muestra un comportamiento constante de la BER con respecto a la variación de la longitud de la fibra, esto se debe a la aproximación hecha por la función erfc de la ecuación (3.2), la cual al obtener valores altos para el factor Q, toma el mejor y más probable valor para la BER, en este caso $1e-40$ y lo asume como constante [O.201 ITU-T].

La Figura 120, muestra el comportamiento de la potencia con relación a la longitud de la fibra, donde entre más fibra se tenga en el enlace, se introduce más atenuación y pérdidas en el mismo, por lo tanto a pesar de tener una potencia constante en la transmisión, esta decrece de manera lineal en cuanto la longitud del enlace es mayor.

Figura 119. BER vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).

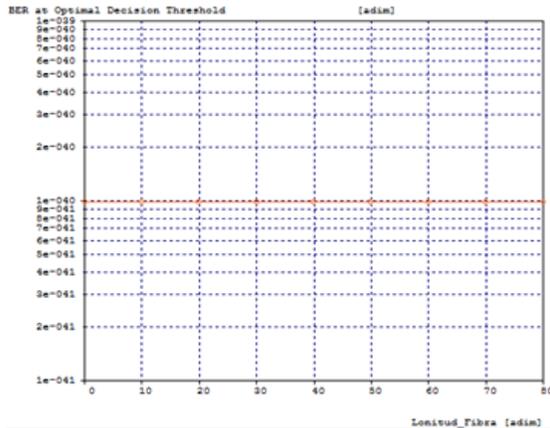
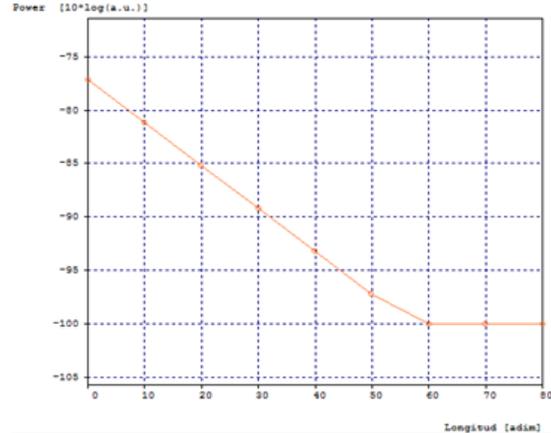


Figura 120. Potencia de Recepción vs Longitud de la Fibra - Caso de Estudio 4 (Espaciamiento 25 GHz).



Como se observa en este caso de estudio, el formato de modulación RZ-DPSK permite al sistema reducir el ancho de banda usado por la señal sin deteriorar la transmisión de la misma, por lo tanto, este formato es mucho más robusto frente a las degradaciones ópticas, efectos lineales y no lineales comparado con el formato NRZ-OOK, para el cual es necesario modificar la red e introducir módulos compensadores para que al reducir el espaciamiento entre canales, la transmisión no se vea afectada por las degradaciones ópticas presentes en la red.

Para finalizar, es necesario analizar como las variaciones anteriores en la red de prueba, pueden mejorar o no la ISD, para esto se hace uso de las ecuaciones (1.3) y (1.5) planteadas en el capítulo 1, los resultados obtenidos se observan en a continuación.

Tabla 28. Cálculo del ancho de banda del sistema RZ-DPSK para 4 canales de 2.5GHz

Caso de Estudio 4: RZ-DPSK 16 Canales de 2.5 GHz			
Espaciamiento [GHz]	BW por Canal [GHz]	OSNR por Canal [DB]	BW sistema 16 Canales [THz]
100	8	30.17	1.508
50	8	23.70	0.754
25	8	7.02	0.377

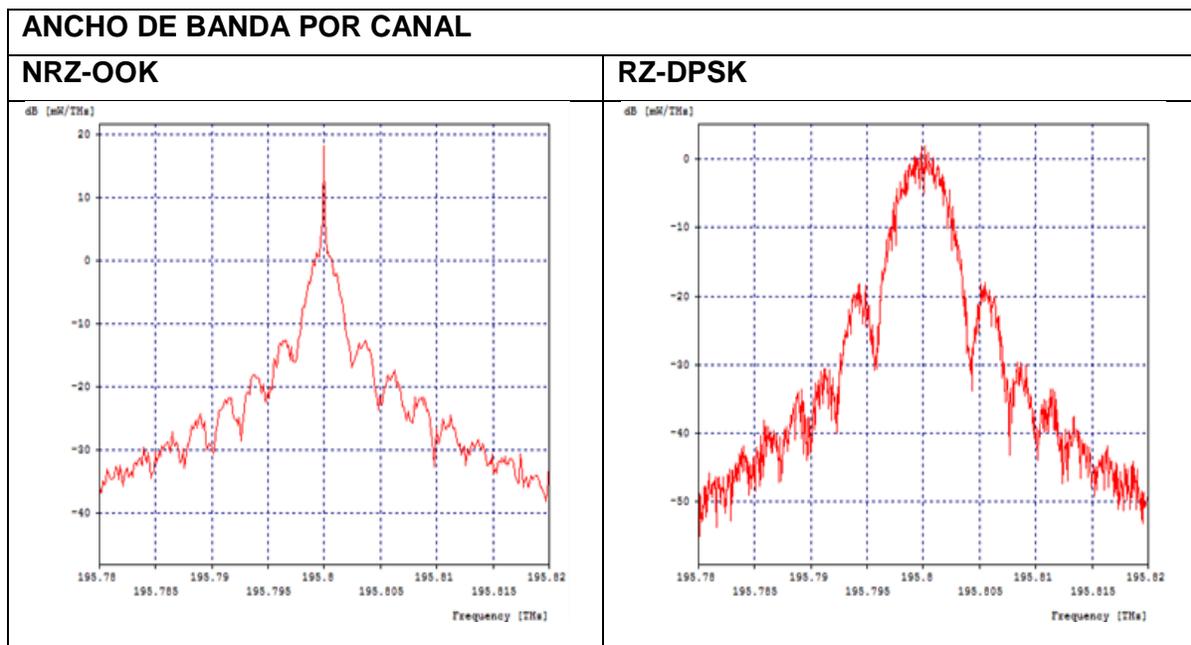
Después de observar las mejores obtenidas en la red de prueba al implementar el formato de modulación RZ-DPSK para 4 canales a 2.5 Gbps, se procede a aumentar el número de canales transmitidos a 16 igual que en el caso de estudio 2, como se observa en la Tabla 28, el ancho de banda del sistema se puede reducir aproximando los canales entre si hasta los 25 GHz sin que la transmisión se vea afectada o deteriorada por las degradaciones ópticas presentes en la red, por lo tanto con este formato de modulación en fase, no es necesario realizar compensación, es decir que es posible mejorar la ISD del sistema sin necesidad de adicionar módulos compensadores o equipos amplificadores a la red.

El formato de modulación RZ-DPSK presenta un excelente comportamiento frente a la ISD, pues es posible transmitir la misma cantidad de información en un mucho menor ancho de banda, cumpliendo con los estándares de calidad objetivo.

4. IMPACTO DEL FORMATO DE MODULACION SOBRE LA ISD EN UNA RED DWDM A 10 GBPS Y 40 GBPS A NIVEL DE TRANSPORTE.

Una vez desarrollados los casos de estudio planteados para el presente trabajo de grado, mediante la herramienta de simulación en la cual los diferentes formatos se configuraron bajo las mismas condiciones con el fin de compararlos entre si y definir cuál es impacto que estos producen sobre la ISD en la red de prueba, se procede a consignar los resultados obtenidos en la siguiente Figura.

Figura 121. Análisis Comparativo de los Formatos de Modulación con respecto al Ancho de Banda Ocupado por Canal.



En la Figura 109., se comparan los espectros de canal de los formatos de modulación estudiados en este trabajo de grado, NRZ-OOK y RZ-DPSK, y se evidencia que para el espectro del formato RZ-DPSK, la potencia de la señal esta mas distribuida a lo largo del mismo, comparado con la modulación NRZ-OOK, además, según su forma de onda la potencia está presente en todas las cadenas de bits mientras que para NRZ-OOK las señales presentan transiciones repentinas en la intensidad en función de la secuencia de bit transmitida, por esta razón, RZ-DPSK es un formato más robusto frente a las degradaciones ópticas y a los fenómenos lineales y no lineales, lo cual es una gran ventaja para la ISD del

sistema pues es posible transmitir altos volúmenes de información en un menor ancho de banda del que se ocuparía con el formato NRZ-OOK, sin necesidad de compensación y obteniendo una señal fiable en el receptor.

Tabla 29. Análisis comparativo de los formatos de modulación con respecto a los Parámetros de Monitoreo Óptico de los Diferentes Casos de Estudio

Formato De Modulación	Número de Canales	Velocidad neta por canal	Velocidad neta del sistema a nivel de transporte	Espaciamiento entre Canales [GHz]	BER por Canal [dB]	Factor Q por canal [dB]	PRX por Canal [dBm]	OSNR por Canal [dB]
NRZ-OOK	4	2.5	10	100	1e-40	28.67	-18.93	35.04
		2.5	10	50	1e-40	29.17	-18.93	29.36
		2.5	10	25	4.25e-14	17.45	-18.93	21.15
	16	2.5	10	100	1e-40	25.65	-19.23	28.57
		2.5	10	50	1e-40	24.60	-19.19	22.52
		2.5	10	25	2.54e-12	16.92	-19.20	12.88
RZ-DPSK	4	2.5	10	100	1e-40	32.09	-25.34	30.33
		2.5	10	50	1e-40	31.97	-25.33	24.26
		2.5	10	25	1e-40	31.81	-25.31	17.38
	16	2.5	10	100	1e-40	29.68	-25.59	26.94
		2.5	10	50	1e-40	29.59	-25.72	19.82
		2.5	10	25	1e-40	29.53	-25.68	7.02

La Tabla 27, muestra una recopilación de los datos obtenidos en la simulación de los diferentes casos de estudio para los parámetros de monitoreo óptico con el fin de determinar que el enlace cumple con las condiciones mínimas de funcionamiento definidas para este trabajo de grado haciendo uso de los diferentes formatos, en ella se observa que el formato que mejor se comportó frente a la reducción del espaciamiento entre canales y del ancho de banda del sistema, es el formato RZ-DPSK ya que este sin necesidad de compensación, supera los valores objetivos de BER y Factor Q planteados en el presente trabajo de grado, además soporta el aumento de longitudes de onda sobre una misma fibra a igual velocidad y con un menor ancho, sin deteriorar la calidad de la señal recibida, por lo tanto este formato de modulación en fase, tiene un excelente comportamiento frente a la ISD, sin embargo con el formato NRZ-OOK también es posible reducir el ancho de banda del sistema y obtener una señal óptima en el receptor, pero es necesario introducir en la red módulos de fibra compensadora DCF, es decir que el comportamiento de este formato de modulación en amplitud es aceptable frente a la ISD comparado con los resultados obtenidos para RZ-DPSK.

Tabla 30. Análisis Comparativo de los Formatos de Modulación con Respecto al Diagrama del Ojo y el Ancho de Banda del Sistema para los Caso de Estudio 1 y 3.

		4 CANALES DE 2.5 Gbps	
ESPACIAMIENTO		NRZ-OOK	RZ-DPSK
100 GHz	DIAGRAMA DEL OJO		
	ESPECTRO		
50 GHz	DIAGRAMA DEL OJO		
	ESPECTRO		
25 GHz	DIAGRAMA DEL OJO		
	ESPECTRO		

Al comparar los diagramas del ojo y espectros obtenidos de la herramienta de simulación para los casos de estudio 1 y 3, donde se implementaron 4 longitudes de onda a una velocidad de 2.5 Gbps cada una, como se muestra en la Tabla 30. es evidente que el formato de modulación NRZ-OOK se ve más afectado por las degradaciones ópticas que el formato RZ-DPSK aun cuando sus canales están ampliamente espaciados, pues se observa presencia de ruido, dispersión cromática y FWM entre otros efectos tanto lineales como no lineales y a medida que se reduce el espaciamiento entre canales para mejorar la ISD transmitiendo la misma información en un menor ancho de banda, las degradaciones de la señal de NRZ-OOK aumentan generando la necesidad de implementar módulos de compensación de fibra DCF, mientras que en RZ-DPSK es posible realizar las mismas reducciones de ancho de banda del sistema sin que la señal sufra algún deterioro significativo debido a las degradaciones ópticas de la transmisión.

La ventaja que tiene el formato de modulación RZ-DPSK sobre NRZ-OOK se debe a que el formato RZ-DPSK distribuye su potencia a lo largo de su espectro a diferencia de NRZ-OOK, lo cual lo hace tolerante frente a las degradaciones ópticas, además RZ-DPSK no presenta picos de potencia como los que se observan en NRZ-OOK, esto ayuda a disminuir el efecto kerr en la red, también se debe tener en cuenta que RZ-DPSK detecta la señal en forma balanceada por lo que necesita de 3 dB menos que NRZ-OOK para obtener una determinada BER y por esto le es posible alcanzar una mayor distancia de transmisión con una potencia determinada o una distancia establecida utilizando una menor potencia en el transmisor.

Tabla 31. Análisis Comparativo de los Formatos de Modulación con Respecto al Diagrama del Ojo y el Ancho de Banda del Sistema para los Caso de Estudio 2 y 4.

		16 CANALES DE 2.5 Gbps	
ESPACIAMIENTO		NRZ-OOK	RZ-DPSK
100 GHz	DIAGRAMA DEL OJO		
	ESPECTRO		
50 GHz	DIAGRAMA DEL OJO		
	ESPECTRO		
25 GHz	DIAGRAMA DEL OJO		
	ESPECTRO		

Como se observa en la Tabla 31, se compararon los diagramas del ojo y espectros obtenidos de la herramienta de simulación para los casos de estudio 2 y 4, donde se implementaron 16 longitudes de onda a una velocidad de 2.5 Gbps cada una, en los cuales se evidencia cómo al aumentar la cantidad de información transmitida, el formato de modulación NRZ-OOK se ve altamente afectado por las degradaciones ópticas de la red, como lo son el ruido, la PMD, la CD, la FWM, entre otros fenómenos lineales y no lineales que se van haciendo más críticos cuando más pequeño es el espaciamiento entre los canales, mientras que para el formato RZ-DPSK es posible aumentar significativamente el volumen de información transmitida en un mínimo ancho de banda del sistema, sin verse afectado por estas degradaciones.

Las Tablas 32 y 33 muestran los volúmenes de información que se transmiten para los caso de estudio correspondientes a NRZ-OOK y a RZ-DPSK respectivamente, además en ellas se encuentran consignados los valores para la eficiencia espectral, también conocida como ISD cuando se trata de una única λ y la ISD total del sistema, obtenidos en cada caso, con estos datos, se hace evidente como RZ-DPSK mejora sustancialmente la eficiencia del sistema con respecto a NRZ-OOK, ya que además de ser posible una máxima reducción del espaciamiento entre los canales implementados, también se logra obtener una ISD por canal de 1.6 b/s/Hz en el caso más crítico de espaciamiento de 25 GHz en el cual para NRZ-OOK es imposible transmitir exitosamente.

Con respecto a la ISD del sistema, el impacto que se tiene al cambiar el formato de modulación es positivo pues al migrar del formato NRZ-OOK al RZ-DPSK se obtienen mejores resultados con respecto a la ocupación del espectro y a la eficiencia de la red, como se muestra en las Tablas, sin embargo al comparar el caso en el que se transmite una sola λ con los demás caso en los que el número de λ s aumenta ($\lambda=4,16$), se hace evidente el desperdicio de ancho de banda debido a que al transmitir múltiples longitudes de onda es necesario tener bandas de guarda y separación entre las λ s, mientras que al transmitir una sola longitud de onda, esta ocupara únicamente su propio ancho de banda.

Tabla 32. Eficiencia Espectral e ISD para el Formato NRZ-OOK

NRZ-OOK					
ACCESO	CAPACIDAD DE TRANSPORTE	DISTANCIA	CAPACIDAD X DISTANCIA PRE-ISD	EFICIENCIA ESPECTRAL – ISD [CH]	ISD [SYS] * B_w [OCU]
2.5 Gbps	2.5 Gb/s (1λ x 2.5Gbps)	80 Km	200 Gb/s * Km	ΔV = 100GHz 0.025 b/s/Hz	2.5 Gb/s en 4GHz 0.625 b/s/Hz
2.5 Gbps	10 Gb/s (4λ x 2.5Gbps)	80 Km	800 Gb/s * Km	ΔV = 100GHz 0.1 b/s/Hz	10 Gb/s en 0.3THz 0.033 b/s/Hz
				ΔV = 50GHz 0.2 b/s/Hz	10 Gb/s en 0.15THz 0.066 b/s/Hz
				ΔV = 25GHz NO ES POSIBLE	NO ES POSIBLE
2.5 Gbps	40 Gb/s (16λ x 2.5Gbps)	80 Km	3200 Gb/s * Km	ΔV = 100GHz 0.4 b/s/Hz	40 Gb/s en 1.505THz 0.026 b/s/Hz
				ΔV = 50GHz 0.8 b/s/Hz	40 Gb/s en 0.752THz 0.053 b/s/Hz
				ΔV = 25GHz NO ES POSIBLE	NO ES POSIBLE

Tabla 33. Eficiencia Espectral e ISD para el Formato RZ-DPSK

RZ-DPSK							
ACCESO	CAPACIDAD DE TRANSPORTE	DISTANCIA	CAPACIDAD X DITANCIA	EFICIENCIA ESPECTRAL – ISD [CH]	PENALIDADES DE POTENCIA	APORTE EN LA OSNR	ISD [SYS] * B _w [OCU]
2.5 Gbps	2.5 Gb/s (1λ x 2.5Gbps)	80 Km	200 Gb/s * Km	ΔV = 100GHz 0.025 b/s/Hz	+ 1 dB	Aprox [1.1 1.5]dB	+ a 2.5 Gb/s en 8GHz 0.312 b/s/Hz
2.5 Gbps	10 Gb/s (4λ x 2.5Gbps)	80 Km	800 Gb/s * Km	ΔV = 100GHz 0.1 b/s/Hz	+ 1 dB	Aprox [1.1 1.5]dB	+ a 10 Gb/s en 0.308THz 0.032 b/s/hz
				ΔV = 50GHz 0.2 b/s/Hz	+ 1 dB	Aprox [1.1 1.5]dB	+ a 10 Gb/s en 0.154 THz 0.065 b/s/hz
				ΔV = 25GHz 0.4 b/s/Hz	+ 1 dB	Aprox [1.1 1.5]dB	+ a 10 Gb/s en 0.077 THz 0.13 b/s/hz
2.5 Gbps	40 Gb/s (16λ x 2.5Gbps)	80 Km	3200 Gb/s * Km	ΔV = 100GHz 0.4 b/s/Hz	+ 3 dB	Aprox [1.1 1.5]dB	+ a 40 Gb/s en 1.508THz 0.026 b/s/Hz
				ΔV = 50GHz 0.8 b/s/Hz	+ 3dB	Aprox [1.1 1.5]dB	+ a 40 Gb/s en 0.754THz 0.053 b/s/Hz
				ΔV = 25GHz 1.6 b/s/Hz	+ 3dB	Aprox [1.1 1.5]dB	+ a 40 Gb/s en 0.377THz 0.106 b/s/Hz

Por último, después de determinar los formatos de modulación que han generado mayor atención en comunicaciones ópticas sobre redes DWDM y de evaluar, mediante la herramienta de simulación OptSim® de Synopsis, el impacto de estos formatos de modulación sobre la ISD en la red propuesta en el desarrollo del presente trabajo de grado, se concluye que:

El formato de modulación RZ-DPSK presenta la mejor tolerancia con respecto a los efectos lineales y no lineales, permitiendo redes de alta eficiencia espectral, manteniendo los parámetros de monitoreo óptico dentro del rango objetivo, así mismo, mejora la ISD del sistema al ser capaz de aumentar el volumen de información transmitida y reducir el ancho de banda ocupado por la misma, sin verse afectado por las degradaciones ópticas o por efectos lineales y no lineales, permitiendo alcanzar una eficiencia espectral máxima de 1.6 b/s/Hz, sin necesidad de implementar módulos de compensación o amplificación adicionales, por lo tanto la ISD es un parámetro que depende directamente de la robustez del formato de modulación implementado en la red ya que al cambiar de un formato de modulación binario básico como lo es NRZ-OOK a uno multinivel como RZ-DPSK el impacto sobre la ISD es totalmente positivo.

➤ **PARAMETROS DE MONITOREO OPTICO vs ISD**

Una vez que se ha determinado la ISD del sistema es necesario analizar qué pasa cuando nos vamos hacia los límites del funcionamiento del sistema es decir cuando llevamos al límite los factores de potencia, la BER, el factor Q y la OSNR para determinar si al mejorar la ISD, los parámetros de monitoreo óptico siguen arrojando valores que superen los mínimos establecidos para una comunicación aceptable [59], esto se analiza en los mismos cuatro casos de estudio, pero variando sus parámetros de configuración con el fin de determinar la máxima tolerancia del sistema, para esto, se procede a llevar los parámetros de monitoreo óptico hasta los límites mínimos, que definen una BER de $1e-12$ un factor Q de 7 dB, para esto se varia la distancia del enlace y posteriormente la potencia del mismo, con lo cual se determina que para NRZ-OOK la máxima distancia alcanzada a una potencia de transmisión de 7dB es 155 Km cuando se implementan 4 longitudes de onda, cada una a 2.5 Gbps espaciadas a 100 GHz, mientras que cuando se implementan 16 longitudes de onda a la misma velocidad de transmisión, la distancia máxima alcanzable del enlace son 151 Km, finalmente, se varia el espaciamiento entre canales para mejorar la ISD del enlace y ver si para los diferentes valores de ISD obtenidos en la Tabla 32, los parámetros de monitoreo continúan superando los objetivos. Los datos obtenidos en este proceso de simulación se muestran en la Tabla 34 y Tabla 35.

Tabla 34. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para NRZ-OOK con 4 λ de 2.5 Gbps c/u.

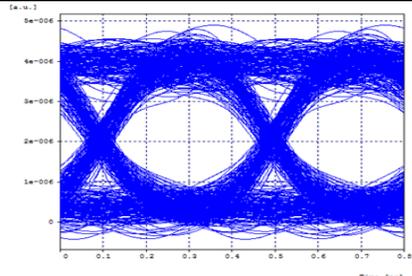
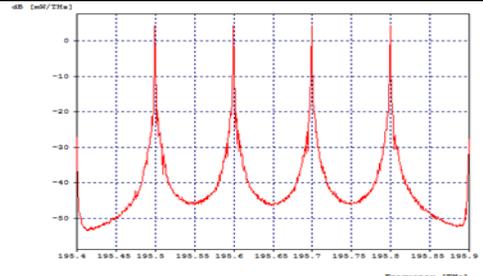
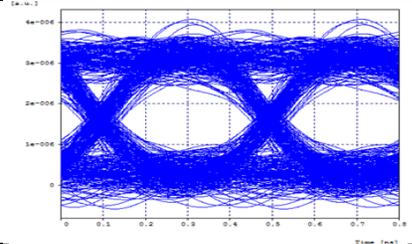
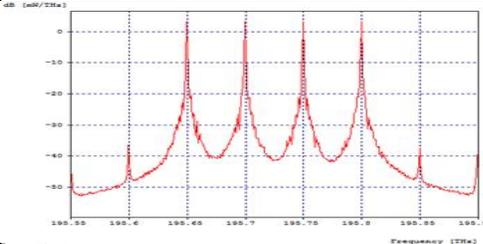
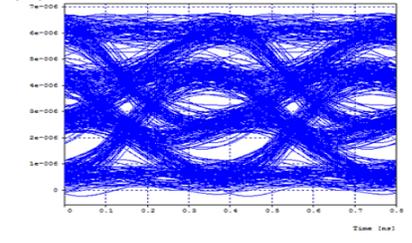
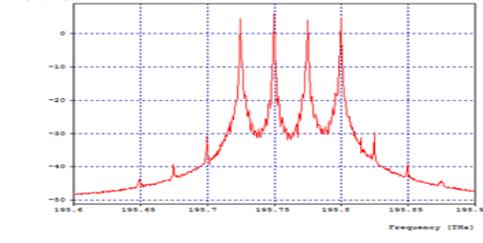
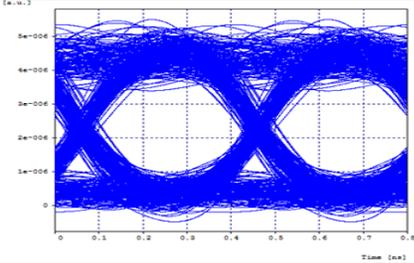
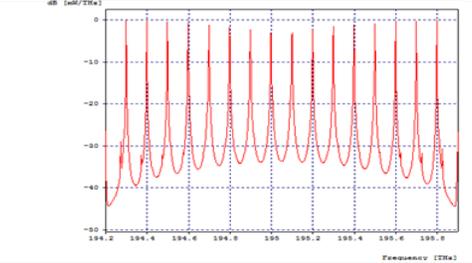
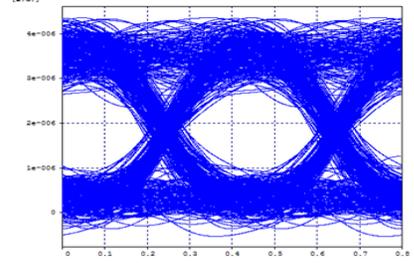
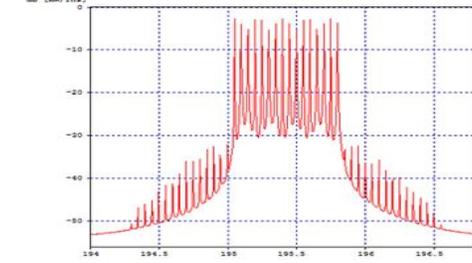
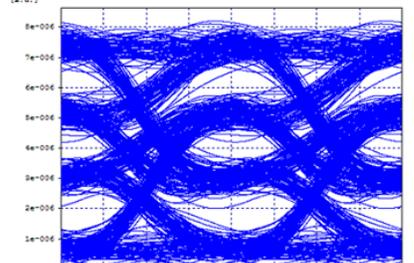
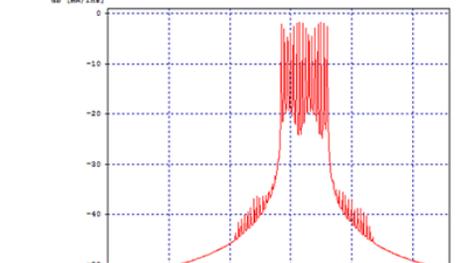
NRZ-OOK con 4 λ de 2.5 Gbps c/u (Distancia Máxima =155 Km)						
Esp. [GHz]	Diagrama del Ojo	Espectro Óptico para 4 λ de 2.5 Gbps c/u	Factor Q por Canal [dB]	BER por Canal [dB]	OSNR por Canal [dB]	ISD del Sistema
100			16.61	8.02e-12	40	0.033
50			14.77	3.78e-08	33	0.066
25			6.33	0.019	22.77	No es Posible

Tabla 35. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para NR-OOK con 16 λ de 2.5 Gbps c/u.

NRZ-OOK con 16 λ de 2.5 Gbps c/u (Distancia Maxima =151 Km)						
Esp. [GHz]	Diagrama del Ojo	Espectro Óptico para 16 λ de 2.5 Gbps c/u	Factor Q por Canal [dB]	BER por Canal [dB]	OSNR por Canal [dB]	ISD del Sistema
100			16.87	5.23e-12	33.70	0.026
50			14.92	1.55e-8	21.55	0.053
25			6.02	0.022	9.09	No es Posible

En la Tabla 34 y Tabla 35 se observa como al aumentar la distancia del enlace, inmediatamente se ven afectados los parámetros de monitoreo óptico, sin embargo el mejor de los casos se encuentra cuando los canales están espaciados entre sí por 100 GHz por lo que este caso nos sirve de comparación, para el resto de los casos en los que se mejoró la ISD al disminuir el espaciamiento entre canales, se observa que el enlace no es capaz de cumplir con los valores objetivos de OPM, por lo tanto se puede determinar que la ISD es un factor determinante en la red propuesta para el formato de modulación NRZ-OOK pues si la configuración de esta red se encuentra en el límite de su funcionamiento, no será posible mejorar la ISD manteniendo los parámetros de monitoreo óptico dentro del rango aceptable; el peor de los casos se presenta cuando los canales están espaciados a 25 GHz, pues con esta configuración sería imposible llevar a cabo la transmisión, ya que además de no cumplir con los objetivos de BER y Factor Q, en los diagramas del Ojo se observa la presencia de múltiples efectos que distorsionan totalmente los pulsos transmitidos, por lo cual no es posible su recuperación en el receptor.

Este análisis también se realizó para el formato de modulación RZ-DPSK, variando sus parámetros de configuración con el fin de determinar la máxima tolerancia del sistema, para esto, se procede a llevar los parámetros de monitoreo óptico hasta los límites mínimos, que definen una BER de $1e-12$ un factor Q de 7 dB, para esto se varia la distancia del enlace y posteriormente la potencia del mismo, con lo cual se determina que para RZ-DPSK la máxima distancia alcanzada a una potencia de transmisión de 7dB es 850 Km cuando se implementan 4 longitudes de onda, cada una a 2.5 Gbps, mientras que cuando se implementan 16 longitudes de onda a la misma velocidad de transmisión, la distancia máxima alcanzable del enlace son Km, posteriormente, se varia el espaciamiento entre canales para mejorar la ISD del enlace y ver si para los diferentes valores de ISD obtenidos en la Tabla 33, los parámetros de monitoreo continúan superando los objetivos, los datos obtenidos en este proceso de simulación se muestran en la Tabla 36 y Tabla 37.

Tabla 36. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para RZ-DPSK con 4 λ de 2.5 Gbps c/u.

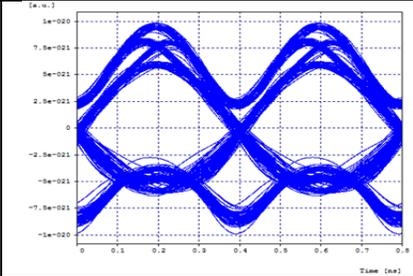
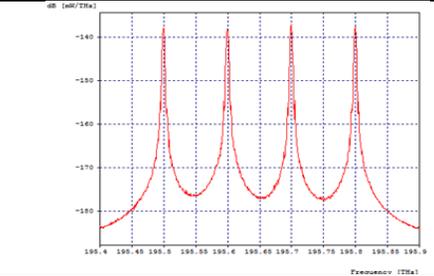
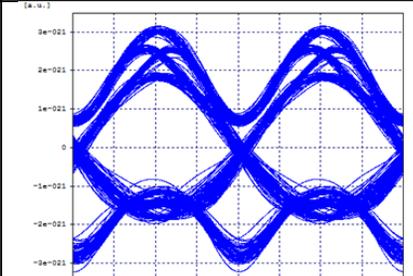
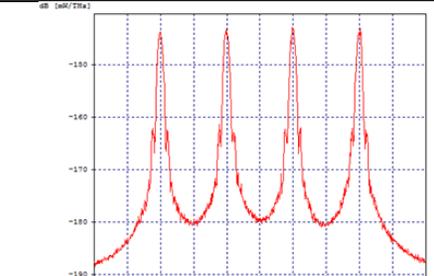
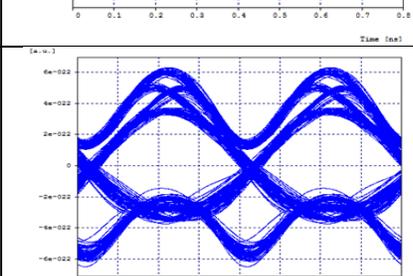
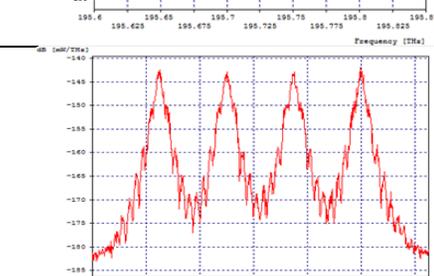
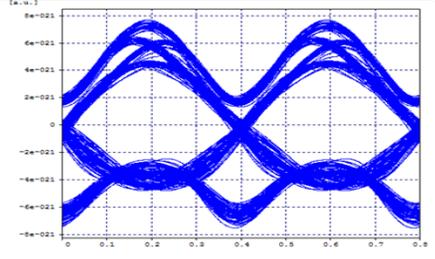
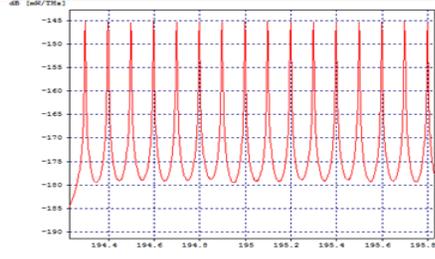
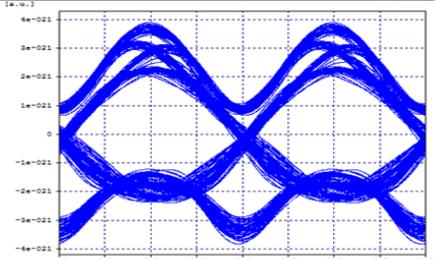
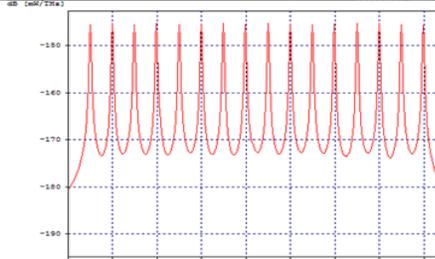
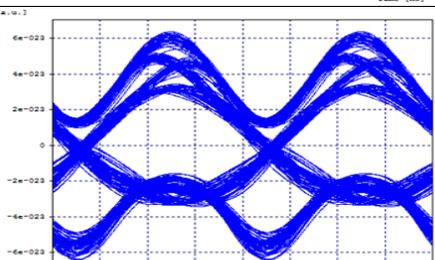
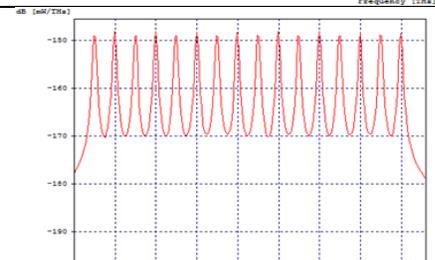
RZ-DPSK con 4 λ de 2.5 Gbps c/u (Distancia Máxima=850 Km)						
Esp. [GHz]	Diagrama del Ojo	Espectro Óptico	Factor Q por Canal [dB]	BER por Canal [dB]	OSNR por Canal [dB]	ISD del Sistema
100			16.72	8.08e-12	36.08	0.032
50			16.13	9.17e-11	31.91	0.065
25			15.86	2.60e-10	21.82	0.130

Tabla 37. Parámetros de Monitoreo Óptico vs ISD para RZ-DPSK con 16 λ de 2.5 Gbps c/u.

RZ-DPSK con 16 λ de 2.5 Gbps c/u (Distancia Maxima =787 Km)						
Esp. [GHz]	Diagrama del Ojo	Espectro Óptico	Factor Q por Canal [dB]	BER por Canal [dB]	OSNR por Canal [dB]	ISD del Sistema
100			16.80	2.71e-12	29.73	0.026
50			16.67	1.13e-11	24.61	0.053
25			15.36	3.67e-9	17.85	0.106

En la Tabla 35 y Tabla 36 se muestra como en la red planteada para el formato de modulación RZ-DPSK en el mejor de los casos, donde sus canales se encuentran espaciados a 100GHz, es posible cubrir mayores distancias comparado con el formato NRZ-OOK, sin embargo al reducir los espaciamientos entre canales, los parámetros de monitoreo óptico no cumplen con el mínimo establecido para una comunicación aceptable, es decir que si el enlace se encuentra en el límite de funcionamiento, para RZ-DPSK tampoco es posible mejorar la ISD.

Por lo tanto, si se requiere hacer un buen uso del espectro óptico, mejorando la ISD del sistema, es necesario configurar de manera adecuada los elementos de la red de tal forma que esta no se encuentre en el límite de su funcionamiento.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, resultado del desarrollo del presente trabajo de grado, relacionando los aspectos más importantes que dieron cumplimiento a los objetivos propuestos.

Las conclusiones son resultado de los objetivos y el trabajo desarrollado para alcanzarlos, las recomendaciones son producto de la metodología y ejecución de la simulación y los trabajos futuros sobre la simulación y otro tipo de análisis que se puede realizar sobre los sistemas de fibra en sistemas DWDM.

5.1 CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos mediante simulación, se comprobó, que el formato de modulación RZ-DPSK, presenta un mejor desempeño sobre la ISD respecto a los parámetros de monitoreo óptico (OPM), que el formato NRZ-OOK debido a que presenta una mayor tolerancia ante los efectos lineales y no lineales.

Se comprobó que para 4 canales, los formatos de modulación estudiados en el presente trabajo de grado, presentan un mejor comportamiento frente a las degradaciones ópticas comparado con los casos en los que se implementan 16 canales.

En los formatos de modulación estudiados, se determinó que a mayor espaciamiento entre canales, mejor es el comportamiento de la red ante los efectos lineales de ruido, pérdidas por atenuación, y ante la variación de la PMD.

Al realizar el análisis de los formatos de modulación estudiados en el presente trabajo de grado, se determinó que bajo algunas condiciones, NRZ-OOK sigue siendo una buena solución permitiendo sistemas dentro de los parámetros objetivos. Sin embargo, si el deseo es migrar a redes con alta eficiencia espectral incrementando características como el volumen de información, número de canales y velocidad de transmisión, RZ-DPSK se muestra como la mejor opción de formato de modulación.

Para que el formato de modulación NRZ-OOK pueda alcanzar valores similares a los parámetros de monitoreo óptico obtenidos con el formato de modulación RZ-DPSK, es necesario introducir en la red módulos al 50% de compensación DCF y mejorar la sensibilidad del receptor.

5.2 RECOMENDACIONES

Para realizar el estudio del presente trabajo de grado es necesario tener en cuenta algunas recomendaciones que se presentan a continuación y que ayudan a la obtención y análisis de los resultados.

Se debe definir el entorno de simulación y el alcance de la investigación, ya que los formatos de modulación reaccionan de diferente manera frente a la variación de las características de la red.

Se debe definir los formatos de modulación que serán estudiados en el proyecto, debido a se generan nuevos formatos día a día.

Es necesario definir una metodología de simulación antes de iniciar el proceso de simulación y de este modo garantizar la obtención de resultados claros y acordes al contexto en el que se desarrolla el trabajo.

Se debe definir un buen entorno de simulación. La herramienta OptSim® de Synopsis ofrece una gran cantidad de características de simulación que permite tener resultados precisos y confiables. Esta herramienta es de gran utilidad para implementar nuevas áreas entorno a los sistemas de comunicaciones ópticas, permitiendo la simulación, estudio y comprensión de redes de nueva generación.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

Mediante el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, se identificaron nuevas investigaciones concernientes al análisis del impacto del formato de modulación sobre la ISD en una red DWDM a 10 Gbps y 40 Gbps, estas son:

Analizar el impacto de del formato de modulación sobre la ISD en una red DWDM a 100Gbps.

Analizar el desempeño de los formatos NRZ/RZ -DQPSK sobre la ISD en una red DWDM a 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps.

Analizar el impacto de diferentes tipos de fibra comerciales sobre la ISD en una red DWDM a 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps.

Trabajar con distintos métodos de compensación para mejorar el desempeño de los formatos de modulación sobre la ISD para altas velocidades.

Análisis del desempeño de formatos de modulación sobre la ISD para el uso de amplificadores y enlaces concatenados.

REFERENCIAS

- [1] «Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 40Gbps and 100 Gbps Operation,» IEEE Std.802.3ba, 2010.
- [2] O. I. Gaxiola , «Simulador de un Sistema de Comunicación Óptico Empleando Multicanalización por División de Longitudes de Onda (WDM),» Maestría, Tijuana, Mexico, 2005.
- [3] G. López, A. Toledo, J. P. Agredo y H. Ordoñez, «Efectos No lineales y su Relación con los Parámetros de Transmisión de una Red WDM,» *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, vol. 20, nº 31, pp. 22-35, 2011.
- [4] A. F. Escallon y J. Barrios, «Criterios para el Monitoreo del Canal Óptico y la Incidencia de los Parámetros que Afectan la Calidad de la Señal Óptica en el Desempeño de una Red Metropolitana WDM”,», Trabajo Fin de Carrera, Dep. Telecomunicaciones, universidad del Cauca, popayán.
- [5] *Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexación por división de longitud de onda densa*, UIT-T G.694.2 , 2012.
- [6] «Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength grid,» G.694.2, ITU-T, 2003.
- [7] «ip redes integradas».
- [8] C. Consultants, « Wavelength Division Multiplexing – CWDM vs DWDM,» Presentación, Fargo, Julio, 2006.
- [9] R. J. Millán, «WDM Corrige las limitaciones de la fibra,» *Redes & Telecom*, vol. 201, 2006.
- [10] H. Technologies, «WDM Principle,» Huawei.
- [11] J. Pinto, C. Pinheiro Machado, M. Portes y N. Alves, «DWDM em Redes Metropolitanas,» CBPF, 2002.
- [12] W. Mostert y D. Emms, «O Band WDM Expand Capacity without adding new fiber,» *Communications Technology*, vol. 25, p. 46, 2008.
- [13] G. Gomez y J. F. Grijalba, «Análisis de Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM,» Trabajo Fin de Carrera, Dep. Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2010..
- [14] G. Chavarría y C. Ramírez, «Tecnología DWDM,» Santiago de Chile, 2010.
- [15] P. Moreno, «Formatos de Modulación Avanzados para Sistemas de Comunicaciones Ópticas Coherentes,» Pregrado, Sevilla, España, 2011.
- [16] P. Moreno Gomez , *FORMATOS DE MODULACIÓN AVANZADOS*, Sevilla, España: Universidad de Sevilla, Escuela de Ingenieros, Tesis Pregrado., 2011.
- [17] A. B. Carlson , *Communication Systems*, Rensselaer Polytechnic Institute: Mc Graw Hill, 2002.

- [18] L. W. Couch, *Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos*, University of Florida: Pearson Prentice Hall, 2008..
- [19] J. E. Briceño, «Principios de las Comunicaciones,» Universidad de los Andes, Merida, 2005.
- [20] . T. y W. , *Sistemas de Comunicaciones Electronicas*, Pearson Educación. p. 471. ISBN 97026-0316-1, 2003.
- [21] J. A. Alvarado Sanchez, «Estudio de las Principales Técnicas de Modulación,» Tesis Licenciatura, Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Universidad de las Américas Puebla, Mexico, 2005.
- [22] L. Zhao, H. Shankar y A. Nachum, «40G QPSK and DQPSK Modulation,» Inphi Corporation, 2002.
- [23] B. A. Forouzan, *Transmision de Datos y Redes de Comunicaiones*, 2da Edicion, Madrid, España: McGraw-Hill, 2002.
- [24] M. Moghaddasi, M. Bangi y S. Rahman, «Comparison between NRZ and RZ OOK Modulation Format in Chromatic Dispersion compensation in Both Electrical and Optical Compensator,» *Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA)*, pp. 494 - 497, 2011.
- [25] S. Zhang, «Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System,» Tesis de Maestría, The University of Kansas, 2005.
- [26] R.-J. E. P. J. Winzer, «Advanced Optical Modulation Formats,» *Proc. IEEE* Vol. 94, No. 5, pp. 952-985, Mayo., 2006.
- [27] C. Xu, H. N. U. Lucent Technol. Bell Labs, X. Liu, L. Mollenauer y X. Wei, «Comparison of Return-to-Zero Differential Phase-Shift Keying and ON-OFF Keying in long-haul Dispersion Managed Transmission,» *Proc. IEEE*, vol. 15, nº 4, pp. 617 - 619, 2003.
- [28] M. Zaacks, P. T. ECI Telecom, U. Mahlab, P. Mamyshev y C. Rasmussen, «Demonstration of 1000km 43Gb/s RZ-DPSK Transmission Through a 50GHz Channel Spaced WSS,» *Articulo IEEE*, 2006.
- [29] D. M. García Satizaba y R. Santiago Sánchez, «Evaluación del Desempeño del Formato de Modulación CSRZ-DQPSK en una Red WDM,» Trabajo Fin de Carrera, Dep.Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2012.
- [30] L. N. Binh, *Digital Optical Communications*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [31] D. F. Grosz, «Sistema de Comunicaciones por Fibra Optica de Alta Capacidad,» *Articulo*, Buenos Aires, Argentina.
- [32] E. Desurvire, *Clasical and Quantum Information Theory*, Cambridge, UK: Cambridge University, 2009.
- [33] C. Canto, «Capacidad de un Canal,» San Luis Potosi, Mexico..
- [34] D. Van del Borne , «Robust Optical Transmission Systems – Modulation and Equalization,» Tesis Doctoral, Holanda, 2008.

- [35] Telnet Redes Inteligentes, «Fibra Óptica Para NGN – Dispersión Cromática Y PMD,» Zaragoza, España, 2009.
- [36] A. Leiva, M. Tarifeño y R. Olivares, «Efectos de la Dispersión por Modo de Polarización (PMD) en la Propagación de Pulso a Través de Fibras Ópticas,» *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 15, nº 3, pp. 336-343, 2007.
- [37] H. Ordoñez y J. P. Agredo, «Análisis del Desempeño de Redes WDM Frente a Variaciones en los Parámetros de Transmisión y su Incidencia en los Efectos No Lineales,» Pregrado, Universidad del Cauca, 2012.
- [38] G. P. Agrawal, «Nonlinear Fiber Optics and its Applications in Optical Signal Processing,» Institute of Optics, University of Rochester, NY, 2007.
- [39] B. Chomycz, Planning Fiber Optic Networks, McGraw-Hill Professional, 2009.
- [40] D. Grosz, «Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Velocidad,» *CSI boletín 51*, pp. 22-33, 2003.
- [41] G. P. Agrawal, Fiber Optic Communications Systems. Tercera edición, NY: John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [42] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan y G. Sasaki, Networks a Practical Perspective. Segunda edición., San Diego: Academic Press, 2002.
- [43] I. Garcés y J. Mateo, «Fenómenos no Lineales en Fibras Ópticas,» Universidad de Zaragoza,, España, 1997.
- [44] OptSim, «User Guide,» RSoft, 2009 .
- [45] C. Calvin , Optical Performance Monitoring, San Diego: Academic Press, 2010.
- [46] C. Lian-kuan , C. Man-hong y C. Chun-kit , «From Optical Performance Monitoring to Optical Network Management: Research Progress and Challenges,» Hong Kong, China, 2004.
- [47] I.-T. R. G.697, «Características de los medios de transmisión – Características de los componentes y los subsistemas ópticos,» TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, junio, 2004 .
- [48] I.-T. R. O.201, «Aparatos de medida para parámetros de canales ópticos,» TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, julio, 2003.
- [49] E. J. Gualda Manzano, , «Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión,» Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2006.
- [50] «Aparatos de medida para parámetros de canales ópticos,» O.201, ITU-T, 2003.
- [51] D. Knipp y T. Chakma, «Optical Signal to Noise Ratio (OSNR),» International University Bremen, Spring, 2005.
- [52] A. Marín, «Optimización de procedimiento para Medición de Diagrama de Ojo y BER con Equipo de Comunicación por Fibra Óptica,» Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2009.

- [53] «Optical Signal to Noise Ratio (OSNR),» notas de clase para el curso de Fotónica y Comunicaciones Ópticas, Spring, 2005.
- [54] . Z. Yinan y L. Marko , «Ultra-high quality factor optical resonators based on semiconductor nanowires,» *School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University*, vol. 16, Octubre 2008.
- [55] L. M. Bazdresch, «Tutorial de Diagramas de Ojo,» Universidad Jesuita de Guadalajara, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Departamento de Electrónica, México, 2009.
- [56] O. M. Ulgen, J. J. Black, B. Johnsonbaugh y R. Klungle, SIMULATION METHODOLOGY - A PRACTITIONER'S PERSPECTIVE, Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology.
- [57] «Characteristics Of A Single-Mode Optical Fiber And Cable,» G.652, ITU-T, 2009.
- [58] H. Technologies, «MSTP Products OSN 550 & 3500 Brochure,» 2011.
- [59] I.-T. G.652, «Características de las fibras y cables ópticos monomodo,» Sector de Normalización de las Telecomunicaciones UIT, 2005.
- [60] U.-T. G.692, «Interfaces ópticas para sistemas multicanales,» Union Internacional de Telecomunicaciones, 1998.
- [61] A. F. Escallón, J. Barrios y A. Toledo, «INCIDENCIA DE LOS PARAMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA SEÑAL OPTICA EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED METROPOLITANA WDM,» *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, nº 12, pp. 12-19, 2008.
- [62] «Spectral Grids For WDM Applications: DWDM Frequency Grid.,» G.694.1, ITU-T, 2012.
- [63] D. F. Groz, «Sistema de Comunicaciones por Fibra Optica de Alta Capacidad,» *Departamento de Fisica y Matematica*, Intituto Tecnico de Buenos Aires- Argentina.
- [64] C. A. Ararat Mina y E. D. Paz Cordoba, «Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/ DQPSK a 10 y 40 Gbps en una Red Metropolitana DWDM,» Trabajo fin de Carrera, Dep. Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2014.

