

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y  
ELECTRÓNICAS PARA LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES WDM.**



**DANIEL FERNANDO MELO FERNANDEZ  
JAIRO ANDRES RUIZ TOLEDO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT  
POPAYÁN  
OCTUBRE DE 2011**

**ANALISIS DE DESEMPEÑO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y  
ELECTRÓNICAS PARA LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES WDM.**

**DANIEL FERNANDO MELO FERNANDEZ  
JAIRO ANDRES RUIZ TOLEDO**

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

**Director  
Ing. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT  
POPAYÁN  
OCTUBRE DE 2011**

*A DIOS, Todo poderoso y fuente inspiración.*

*Con Amor*

*A mis Abuelos, Padres, Hermana, Tíos, Tía Mamá, Novia y amigos que con su ejemplo, enseñanzas, guía, consejos, motivación y cariños lograron cumplir una de mis primeras metas.*

*Gracias por existir.*

***Daniel F. Melo Fernández***

*A Dios, por regalarme cada día al lado de mi familia.*

*A mis Padres, porque su sacrificio y entrega serán recompensados.*

*A mi Abuela María y Campitos, su recuerdo siempre permanecerá en mi mente y mi corazón, gracias por enseñarme el valor de la vida y la persistencia; ¡ no importa que tanto te esfuerces, sino cuánto resistas para llegar a la meta!.*

***Jairo A. Ruiz Toledo***

## **AGRADECIMIENTOS**

Manifestamos nuestros agradecimientos al Ingeniero Alejandro Toledo, director del trabajo de grado por sus excelentes consejos y dirección como profesional, por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional y personal.

Es importante resaltar las asesorías y recomendaciones en el manejo de la herramienta de simulación OptSim de Rsoft por parte de los Ingenieros Aldo Peruggia, Phd. Pablo Mena, Jigesh Patel del Instituto de investigación tecnológica de la India y ITT, cuyo soporte fue muy valioso para la consecución de los objetivos propuestos. De igual manera a Francisco Apablaza por facilitarnos su material de clase de la escuela de Ingeniería de la Universidad Católica de Valparaíso-Chile.

Siendo igual de importante, queremos presentar nuestros agradecimientos a nuestras familias, amigos, novias y compañeros gracias por serlo y estar siempre.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>PREFACIO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. ESPECIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES WDM. ....</b>	<b>2</b>
1.1 RED WDM.....	3
1.1.1 Fibra óptica principal.....	4
1.1.2 Formatos de modulación.....	5
1.1.3 Amplificador Óptico Dopado con Erblio (EDFA).....	6
1.1.4 Dispersión Cromática (CD).....	7
1.2 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD .....	10
1.2.1 La técnica de post-compensación óptica para la CD.....	13
1.2.2 La técnica de pre-compensación óptica para la CD.....	13
1.3 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ELECTRÓNICAS PARA LA CD .....	14
1.3.1 Las técnicas de post-compensación electrónica para la CD.....	22
1.3.2 Las técnicas de pre-compensación electrónica para la CD.....	24
1.4 MODELO SIMPLIFICADO DE RED .....	24
<b>2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN.....</b>	<b>30</b>
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	30
2.2 ESPECIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y ELECCIÓN DEL MODO DE OPERACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	31
2.3 GENERACIÓN Y DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN.....	32
2.4 PLAN DE EVALUACIÓN Y PRUEBAS.....	34
<b>3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA CD EN REDES WDM.....</b>	<b>36</b>
3.1 ESCENARIO DE SIMULACIÓN EN AUSENCIA DE TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN PARA LA CD - CONFIGURACIÓN 1 .....	37
3.1.1 Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK.....	38
3.1.2 Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.....	41
3.2 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD .....	43
3.2.1 Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.....	46
3.2.2 Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK.....	54
3.2.3 Técnicas de compensación óptica para la CD, mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK.....	60
3.2.4 Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK.....	67

3.3	TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ELECTRÓNICAS PARA LA CD. ....	74
3.3.1	Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.....	77
3.3.2	Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.....	80
3.3.3	Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK.....	88
3.3.4	Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.....	91
3.3.5	Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.....	99
 <b>4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN PARA LA CD EVALUADAS, MEDIANTE LAS CUALES PRESENTAN UN DESEMPEÑO ÓPTIMO EN UNA RED WDM. ....</b>		<b>102</b>
4.1	TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD .....	103
4.2	TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ELECTRÓNICAS PARA LA CD .....	106
4.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS .....	111
 <b>5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS. ....</b>		<b>113</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	114
5.2	RECOMENDACIONES.....	114
5.3	TRABAJOS FUTUROS.....	115
 <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>115</b>

## LISTA DE FIGURAS

### 1. ESPECIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES WDM.....4

Figura 1.1. Esquema modular de una red WDM.....	3
Figura 1.2. Dispersión en función de la longitud de onda para los tipos de fibra monomodo más comunes. ....	5
Figura 1.3. Representación de la ganancia (dB) de un EDFA respecto a la longitud de onda (nm).....	7
Figura 1.4. Clasificación de los efectos lineales.....	7
Figura 1.5. Clasificación de los efectos de dispersión.....	8
Figura 1.6. Factores de dependencia de la CD. ....	10
Figura 1.7. Técnicas de compensación ópticas para la CD aplicadas en una red WDM ....	11
Figura 1.8. Aplicación del amplificador óptico y el DCM.....	11
Figura 1.9. Técnica de post-compensación óptica para la CD.....	13
Figura 1.10. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para CD.....	13
Figura 1.11. Técnica de pre-compensación óptica para la CD.....	14
Figura 1.12. Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD..	14
Figura 1.13. Técnica de compensación electrónica para la CD aplicada en el lugar del receptor de una red WDM.....	15
Figura 1.14. Técnica de compensación electrónica para la CD aplicada en el lugar del transmisor de una red WDM.....	15
Figura 1.15. Disposición de ecualización en una red WDM con (a) una técnica de pre-compensación electrónica para la CD, (b) una técnica de pre-compensación electrónica para la CD.....	16
Figura 1.16. Procesos lineales y no lineales para la ecualización del canal óptico.....	16
Figura 1.17. Ecualizador lineal transversal.....	18
Figura 1.18. Modelo de un canal discreto con ISI.....	19
Figura 1.19. Estructura del FFE.....	20
Figura 1.20. Estructura de un DFE.....	20
Figura 1.21. Combinación de ecualización FFE, DFE y detección (slicer).....	20
Figura 1.22. Cancelación de ISI pre-cursor e ISI post-cursor.....	22
Figura 1.23. Post-compensación electrónica para la CD.....	23
Figura 1.24. Filtro transversal Feed Forward a la entrada y en el lazo cerrado.....	24
Figura 1.25. Pre-compensación electrónica para la CD.....	24
Figura 1.26. Filtro transversal Feed Forward en el lugar del transmisor.....	24
Figura 1.27. Modelo simplificado de red.....	29

### 2. METODOLOGIA Y ESCENARIO DE SIMULACION.....32

Figura 2.1. Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim®.....	31
Figura 2.2. Esquema del escenario de simulación.....	34
Figura 2.3. Diagrama de flujo para el escenario de simulación.....	35

### 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA CD.....37

Figura 3.1. Escenario de simulación implementado en OptSim.....	37
Figura 3.2. Escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación para la CD.....	38
Figura 3.3. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.....	39

Figura 3.4. Diagramas del ojo del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK para una longitud de SMF-28 para, a) back to back, b) 60 km, c) 100 km. ....	39
Figura 3.5. BER estimada vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw. ....	40
Figura 3.6. Factor Q estimado vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw. ....	40
Figura 3.7. Apertura del ojo vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw. ....	40
Figura 3.8. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim. Leyenda: El anexo B muestra la constitución y los elementos que intervienen en el formato de modulación NRZ-DPSK.	41
Figura 3.9. Diagramas del ojo del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK con una longitud de SMF-28 para, a) back to back, b) 60 km, c) 100 km. ....	42
Figura 3.10. BER estimada vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.....	42
Figura 3.11. Factor Q estimado vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.....	42
Figura 3.12. Apertura del ojo vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.....	43
Figura 3.13. Configuración 2: escenario de simulación con la técnica de pre-compensación óptica para la CD. ....	44
Figura 3.14. Configuración 3: escenario de simulación con la técnica de post-compensación óptica para la CD. ....	45
Figura 3.15. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim. ....	47
Figura 3.16. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim. ....	47
Figura 3.17. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK con a) Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 70 a 110 km con incrementos de 5 km, b) Potencia de transmisión de 2 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 110 a 120 km con incrementos de 1km.....	48
Figura 3.18. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK con a) Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 70 a 110 km con incrementos de 5 km, b) Potencia de transmisión de 2 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 110 a 120 km con incrementos de 1km.....	48
Figura 3.19. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. ....	49
Figura 3.20. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de	

transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. ....	49
Figura 3.21. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. ....	49
Figura 3.22. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. ....	49
Figura 3.23. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. ....	49
Figura 3.24. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. ....	49
Figura 3.25. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	50
Figura 3.26. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	50
Figura 3.27. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	51
Figura 3.28. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	51
Figura 3.29. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	52
Figura 3.30. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	52
Figura 3.31. Espectro óptico a la salida del modulador. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a una potencia de transmisión de 1 mw. ....	53
Figura 3.32. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de pre-compensación óptica para la CD para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	53
Figura 3.33. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	53

Figura 3.34. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.....	55
Figura 3.35. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.....	55
Figura 3.36. BER estimada vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.....	56
Figura 3.37. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.....	56
Figura 3.38. OSNR vs Número de Spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.....	57
Figura 3.39. BER estimada vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.....	57
Figura 3.40. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.....	57
Figura 3.41. OSNR vs Número de Spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.....	57
Figura 3.42. Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.....	58
Figura 3.43. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, formato de modulación NRZ-OOK y 6 spans.....	59
Figura 3.44. Dispersión residual del primer span para la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.....	59
Figura 3.45. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK.....	59
Figura 3.46. Dispersión residual del primer span para la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK.....	60
Figura 3.47. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK.....	60
Figura 3.48. Técnica de pre-compensación óptica para la CD para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.....	61
Figura 3.49. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.....	61
Figura 3.50. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	62
Figura 3.51. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	62

Figura 3.52. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	62
Figura 3.53. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	62
Figura 3.54. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	62
Figura 3.55. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con variaciones de 5 km. ....	62
Figura 3.56. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	63
Figura 3.57. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	63
Figura 3.58. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km. ....	63
Figura 3.59. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km. ....	64
Figura 3.60. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km. ....	64
Figura 3.61. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km. ....	65
Figura 3.62. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km. ....	65
Figura 3.63. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km. ....	66
Figura 3.64. Espectro óptico a la salida del modulador. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK a una potencia de transmisión de 1 mw. ....	66
Figura 3.65. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de	

modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.....	66
Figura 3.66. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.....	67
Figura 3.67. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.....	68
Figura 3.68. Técnica de post-compensación óptica para la CD cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.....	68
Figura 3.69. Súper bloque del receptor balanceado. Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK.....	69
Figura 3.70. BER estimada vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.....	70
Figura 3.71. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.....	70
Figura 3.72. OSNR vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. .	70
Figura 3.73. BER estimada vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.....	70
Figura 3.74. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. ....	71
Figura 3.75. OSNR vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. .	71
Figura 3.76. Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.....	72
Figura 3.77. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.....	72
Figura 3.78. Dispersión residual del primer span para la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ- DPSK.....	73
Figura 3.79. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	73
Figura 3.80. Dispersión residual del primer span para la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.....	73
Figura 3.81. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	73
Figura 3.82. Configuración 4: escenario de simulación con la técnica de pre-compensación electrónica para la CD. ....	74
Figura 3.83. Configuración 5: escenario de simulación con la técnica de post-compensación electrónica para la CD. ....	75

Figura 3.84. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en optSim.....	77
Figura 3.85. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Configuración con ausencia de técnica de pre-compensación electrónica para la CD y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB. ....	78
Figura 3.86. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Configuración con ausencia de técnica de pre-compensación electrónica para la CD y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB. ....	78
Figura 3.87. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Configuración con ausencia de técnica de pre-compensación electrónica para la CD y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB. ....	78
Figura 3.88. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB. ....	79
Figura 3.89. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB. ....	79
Figura 3.90. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB. ....	79
Figura 3.91. Diagramas del ojo de la técnica de pre-compensación electrónica para la CD mono canal y con formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC utilizando una ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Potencia de lanzamiento de -7dbm y longitud de SMF-28 de 100km.....	80
Figura 3.92. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.....	80
Figura 3.93. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.....	81
Figura 3.94. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.....	81
Figura 3.95. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps de 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud SMF-28 de 120 km. ....	83
Figura 3.96. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps de 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud SMF-28 de 120 km.....	83
Figura 3.97. Apertura del ojo vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con	

incrementos de 1 mw. Número de taps de 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud SMF-28 de 120 km. ....	84
Figura 3.98. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km. ....	84
Figura 3.99. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km. ....	84
Figura 3.100. Apertura del ojo vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km. ....	84
Figura 3.101. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 FFE-NL, 7 taps FFE y 2 taps DFE. Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	84
Figura 3.102. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 FFE-NL, 7 taps FFE y 2 taps DFE. Longitud de SMF-28 de 120 km. ....	84
Figura 3.103. Apertura del ojo vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 FFE-NL, 7 taps FFE y 2 taps DFE. Longitud SMF-28 de 120 km. ....	85
Figura 3.104. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE. Longitud 115 km de SMF-28. ....	86
Figura 3.105. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 6 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 120 km de SMF-28. ....	86
Figura 3.106. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 7 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 115 km de SMF-28. ....	86
Figura 3.107. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE. Longitud 115 km de SMF-28. ....	87
Figura 3.108. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 6 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 120 km de SMF-28. ....	87
Figura 3.109. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y	

formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 7 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 115 km de SMF-28. ....	87
Figura 3.110. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim. ....	88
Figura 3.111. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim. ....	89
Figura 3.112. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim. ....	89
Figura 3.113. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. ....	90
Figura 3.114. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. ....	90
Figura 3.115. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. ....	90
Figura 3.116. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, implementado en OptSim. ....	92
Figura 3.117. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, implementado en OptSim. ....	92
Figura 3.118. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, implementado en OptSim. ....	92
Figura 3.119. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Número de taps: 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	94
Figura 3.120. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Número de taps: 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	94
Figura 3.121. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Número de taps: 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	94
Figura 3.122. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	94
Figura 3.123. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación	

electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	95
Figura 3.124. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	95
Figura 3.125. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	95
Figura 3.126. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	95
Figura 3.127. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	95
Figura 3.128. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 8 taps en la sección FFE. Longitud 130 km de SMF-28. ....	96
Figura 3.129. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD monocanal y con formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 5 taps en la sección FFE y 2 taps en la sección DFE. Longitud 130 km de SMF-28. ....	97
Figura 3.130. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE del primer ecualizador y 7 taps en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28. ....	97
Figura 3.131. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK. Espectro óptico a) Después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 8 en la sección FFE. Longitud 130 km de SMF-28. ....	98
Figura 3.132. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y con formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) Después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 taps en la sección FFE y 2 taps en la sección DFE. Longitud 130 km de SMF-28. ....	98
Figura 3.133. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK. Espectro óptico a) Después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE del primer ecualizador y 7 taps en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28. ....	98

Figura 3.134. Técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.....	99
Figura 3.135. Técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.....	100
Figura 3.136. Técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.....	100
Figura 3.137. Súper bloque del receptor balanceado. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.....	101
Figura 3.138. Contenido del super bloque MZDI (Interferómetro Diferencial Mach-Zehnder).....	101
Figura 3.139. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.....	101

#### **4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN PARA LA CD EVALUADAS, MEDIANTE LAS CUALES PRESENTAN UN DESEMPEÑO ÓPTIMO EN UNA RED WDM.....104**

Figura 4.1. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-OOK.....	104
Figura 4.2. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.....	104
Figura 4.3. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK, cuatro canales, potencia de transmisión de 4 mw, longitud del span: 87 km de SMF-28 y 18.48 km de DCF.....	105
Figura 4.4. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.....	107
Figura 4.5. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.....	107
Figura 4.6. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 km.....	107
Figura 4.7. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 km.....	107
Figura 4.8. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con	

incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. ....	108
Figura 4.9. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en el lugar del receptor, mono canal. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.....	108
Figura 4.10. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	108
Figura 4.11. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km. ....	108
Figura 4.12. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Potencia de transmisión de 4mw. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE en la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 a 140 km con incrementos de 1km. Formato de modulación NRZ-OOK. ....	110
Figura 4.13. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Potencia de transmisión de 4mw. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE en la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 a 140 km con incrementos de 1km. Formato de modulación NRZ-OOK.....	110
Figura 4.14. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Potencia de transmisión de 4 mw. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE en la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 a 140 km con incrementos de 1km. Formato de modulación NRZ-OOK. ....	110
Figura 4.15. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, cuatro canales con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE. Formato de modulación NRZ-OOK, potencia de transmisión de 4 mw, longitud de SMF-28 de 136 km. ....	111

## LISTA DE TABLAS

### 1. ESPECIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES WDM.....3

Tabla 1.1. Parámetros típicos de una red WDM [11].	3
Tabla 1.2. Parámetros de la Corning SSMF-28.	5
Tabla 1.3. Amplificadores EDFA comerciales.	7
Tabla 1.4. Valores típicos de los parámetros de la DCF	12
Tabla 1.5. Medidas de dispersión y de pérdidas por inserción de los DCMs comerciales	12
Tabla 1.6. Amplificador Corning pure gain 1500 compact de ganancia constante.	26
Tabla 1.7. Máxima distancia del tramo de fibra óptica que puede ser amplificada en función de la ganancia.	26
Tabla 1.8. Plan de Frecuencias para 32 canales a 100 GHz.	28
Tabla 1.9. Características más relevantes del modelo simplificado de red	29

### 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA CD.....41

Tabla 3.1. Medidas de distancia, dispersión, BER estimada, factor Q, potencia en recepción, del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK para una potencia de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw.	41
Tabla 3.2. Medidas de distancia, dispersión, BER estimada, factor Q estimado, potencia en recepción, del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK para una potencia de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw.	43
Tabla 3.3. DCF necesaria para compensar la CD acumulada en el rango e incrementos de SMF-28 mencionados anteriormente para las técnicas de compensación ópticas para la CD.	46
Tabla 3.4. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.	54
Tabla 3.5. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de post compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.	54
Tabla 3.6. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK.	56
Tabla 3.7. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK.	56
Tabla 3.8. BER estimada y factor Q estimado. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.	58
Tabla 3.9. BER estimada y factor Q estimado. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.	58
Tabla 3.10. Dispersión residual por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de	

modulación NRZ-OOK. ....	60
Tabla 3.11. Dispersión residual por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK. ....	60
Tabla 3.12. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de pre-compensación ópticas para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	67
Tabla 3.13. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de post-compensación ópticas para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	67
Tabla 3.14. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	69
Tabla 3.15. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	70
Tabla 3.16. BER estimada y factor Q estimado para 8 spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. ....	71
Tabla 3.17. BER estimada y factor Q estimado para 8 spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. ....	71
Tabla 3.18. Dispersión residual por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	73
Tabla 3.19. Dispersión acumulada por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-DPSK. ....	73
Tabla 3.20. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios en un ecualizador FFE-NL que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. ....	82
Tabla 3.21. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios en un ecualizador DFE que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. ....	82
Tabla 3.22. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios en un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. ....	82
Tabla 3.24. Condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. ....	85

Tabla 3.25. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK. Número de taps: 5 en la sección FFE. Longitud 115 km de SMF-28.....	90
Tabla 3.26. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK. Número de taps: 6 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 120 km de SMF-28.....	91
Tabla 3.27. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK. Número de taps: 7 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 115 km de SMF-28.....	91
Tabla 3.28. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.....	93
Tabla 3.29. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.....	93
Tabla 3.30. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.....	93
Tabla 3.31. Condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK.....	96
Tabla 3.32. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Configuración 5 con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK. Número de taps: 8 en la sección FFE. Longitud 130 km de SMF-28.....	102
Tabla 3.33. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28.....	102
Tabla 3.34. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK. Número de taps: 5 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28.....	102

#### **4. PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN PARA LA CD EVALUADAS, MEDIANTE LAS CUALES PRESENTAN UN DESEMPEÑO ÓPTIMO EN UNA RED WDM.....104**

Tabla 4.1. Medidas OSNR del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace de 500 km. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF. Técnica de pre-compensación y post-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-OOK. ....	104
Tabla 4.2. Medidas OSNR del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace de 500 km. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. Técnica de pre-compensación y post-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK. ....	104
Tabla 4.3. Medidas de OSNR, BER, Factor Q y apertura del ojo. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK, potencia de transmisión de 4 mw, longitud del span: 87 de SMF-28 y 18.48 km de DCF.....	105
Tabla 4.4. Máxima longitud alcanzada con una potencia de 4mw y formato de modulación NRZ-OOK. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. ....	110
Tabla 4.5. Parámetros de monitoreo por canal para una distribución de taps determinada según la dispersión acumulada a compensar para la técnica de post-compensación electrónica para la CD un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE para una longitud de SMF-28 de 136 km, formato de modulación NRZ-OOK y potencia de transmisión de 4mw. ....	111
Tabla 4.6. Análisis comparativo de las técnicas ópticas y electrónicas para la CD. Potencia de transmisión de 4mw. Velocidad de transmisión de 10 Gbps. Leyenda: Longitud efectiva del enlace determinada por la longitud de la SMF-28. ....	112

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Subsistema de una red WDM.....	1
Anexo B: Formato de modulación NRZ-DPSK.....	2
Anexo C: Canal de Fase.....	3
Anexo D: Solución Matemática paso a paso al modelo del filtro transversal.....	4
Anexo E: Proceso de ecualización basado en ZF.....	5
Anexo F: Proceso de ecualización basado en MMSE.....	7
Anexo G: Pre-compensación electrónica para la CD.....	9
Anexo H: Parámetros de monitoreo óptico.....	10
Anexo I: Configuración 1 - Escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK.....	13
Anexo J: Configuración 1 - Escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.....	14
Anexo K: Configuración 2 para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.....	15
Anexo L: Configuración 3 mono canal, span y formato de modulación NRZ-OOK.....	17
Anexo M: Configuración 2 con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.....	19
Anexo N: Configuración 3 con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.....	19
Anexo Ñ: Configuración 2 mono canal, span y formato de modulación NRZ-DPSK.....	20
Anexo O: Configuración 3 mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK.....	22
Anexo P: Configuración 2 con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.....	24
Anexo Q: Configuración 3 con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.....	24
Anexo R: Diodo Láser de Emisión Superficial con Cavidad Vertical (VSCEL).....	25
Anexo S: Configuración 5 mono canal, con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK.....	26
Anexo T: Configuración 5 mono canal, con un ecualizador DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK.....	34
Anexo U: Configuración 5 mono canal, con ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, y formato de modulación NRZ-OOK.....	42
Anexo V: Diagramas del ojo configuración 5 con ecualizadores FFE-NL, DFE y, FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK.....	50
Anexo W: Configuración 5 mono canal, con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK.....	51
Anexo X: Configuración 5 mono canal, con ecualizador DFE en el lugar del receptor, y formato de modulación NRZ-DPSK.....	59
Anexo Y: Configuración 5 mono canal, con ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, y formato de modulación NRZ-DPSK.....	67
Anexo Z: Diagramas del ojo configuración 5 con ecualizadores FFE-NL, DFE y, FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK.....	75

## GLOSARIO DE ACRONIMOS

<b>APD</b>	Avalanche Photodiode	Fotodiodo de Avalancha
<b>BER</b>	Bit Error Rate	Tasa de Error de Bits
<b>CD</b>	Chromatic Dispersion	Dispersión Cromática
<b>CWDM</b>	Coarse Wavelength División Multiplexing	Multiplexación por División de Longitud de onda Ampliamente espaciada
<b>D</b>	Dispersion	Dispersión
<b>DCF</b>	Dispersion Compensating Fiber	Fibra Compensadora de Dispersión
<b>DCM</b>	Dispersion Compensation Module	Módulo de Compensación de Dispersión
<b>DFE</b>	Decision Feedback Equalizer	Ecualizador Re-alimentado de Decisiones
<b>DPSK</b>	Differential Phase Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial
<b>DQPSK</b>	Phase Shift Keying	Modulación por Desplazamiento de Fase
<b>DSF</b>	Dispersion Shifted Fiber	Fibra de Dispersión Desplazada
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength División Multiplexing	Multiplexación por División de Longitud de onda Densamente espaciada
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fiber Amplifier	Amplificador de Fibra Dopado con Erbio
<b>EDC</b>	Electronic Dispersion Compensation	Compensación de dispersión Electrónica
<b>FBG</b>	Fiber Bragg Grating	Fibra de Bragg Grating
<b>FFE</b>	FeedForward Equalizer	Ecualizador Pro-alimentado
<b>FWHM</b>	Ruido de Fase del Laser	Full Width at Half Maximum
<b>IM/DD</b>	Intensity Modulation / Direct Detection	Modulación de Intensidad / Detección Directa
<b>EOP</b>	Eye Opening Penalty	Penalidad del diagrama del Ojo
<b>NRZ</b>	Non Return to Zero	No Retorno a Cero
<b>NZ-DSF</b>	Non Zero-Dispersion Shifted Fiber	Fibras de Dispersión Desplazada No Cero
<b>MLSE</b>	Maximum Likelihood Sequence Estimator	Estimador de Secuencia de Máxima Probabilidad
<b>MMF</b>	Multiple Mode Fiber	Fibra Multi Modo
<b>MMSE-LE</b>	Minimizes Mean Square Error–Linear Ecualizer	Ecualizador Lineal basado en Mínimo Error Cuadrático Medio
<b>ODM</b>	Optical Dispersion Management	Gestión de Dispersión Óptica
<b>OOK</b>	On Off Keying	Modulación por Encendido Apagado
<b>OSNR</b>	Optical Signal to Noise Ratio	Relación Señal a Ruido Óptica
<b>PDS</b>	Digital Signal Processor	Procesamiento Digital de Señales
<b>PMD</b>	Polarization Mode Dispersion	Dispersión de Modo de Polarización
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying	Modulación de Fase
<b>RZ</b>	Return to Zero	Retorno a Cero
<b>SMF</b>	Single Mode Fiber	Fibra Mono Modo
<b>SSF</b>	Split Step Fourier	Paso Dividido de Fourier
<b>SSMF</b>	Standard Single Mode Fiber	Fibra Óptica Mono Modo Estándar
<b>STM</b>	Synchronous Transfer Module	Módulo de Transferencia Síncrono
<b>TDSS</b>	Time Domain Split Step	Paso Dividido en el Dominio del Tiempo
<b>WDM</b>	Wavelength División Multiplexing	Multiplexación por División de Longitud de Onda
<b>ZFE</b>	Zero Forcing Equalization	Ecualizador basado en proceso Forzador de paso por Cero

## PREFACIO

En las redes WDM comerciales las limitaciones impuestas por la Dispersión Cromática (CD) al aumentar la velocidad y la longitud del enlace, principalmente a velocidades iguales o superiores a 10 Gbps, se convierten en una cuestión crítica en todas las clases de fibra óptica monomodo. Este hecho ha dado origen a las técnicas de compensación para la CD clasificadas en técnicas ópticas y electrónicas.

El siguiente trabajo de grado se constituye como una revisión e investigación, con una población objetivo dirigida a expertos, que busca analizar el desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la dispersión cromática en redes WDM, estableciéndose en una guía factible de ser adoptada por los operadores de este tipo de redes, además de consolidarse como un conocimiento en el área de los servicios y arquitecturas de telecomunicaciones.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo y culminación de este trabajo de grado, el contenido consta de cinco capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

### **1. Especificación del comportamiento de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM.**

Es una recolección y especificación de las características y parámetros más relevantes de diferentes técnicas de compensación para la CD. Con base en esta información se define un modelo simplificado de red, constituido en información clave dentro del desarrollo del trabajo de grado.

### **2. Metodología y escenario de simulación.**

A través del desarrollo y cumplimiento de una serie de etapas se plasma el modelo simplificado de red en un escenario de simulación, el cual mediante la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, permite evaluar el desempeño de las diferentes técnicas de compensación para la CD, teniendo en cuenta los parámetros de monitoreo más relevantes en redes WDM.

### **3. Simulación y evaluación de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM.**

Se enfoca en la simulación y evaluación del desempeño de las técnicas de compensación para la CD definidas en el capítulo 1. Este capítulo es desarrollado mediante el escenario de simulación, plan de evaluación y pruebas definido en el capítulo 2.

#### **4. Principales características de las técnicas compensación para la CD evaluadas, mediante las cuales presentan un desempeño óptimo en una red WDM.**

Se identifica mediante el análisis de desempeño de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD realizado en el capítulo 3, las principales características a través de las cuales una red WDM presenta un desempeño óptimo.

#### **5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.**

Se da una serie de conclusiones, recomendaciones y perspectivas a futuro, obtenidas del desarrollo del trabajo de grado.

## 1. ESPECIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES WDM.

En este capítulo se especifican las características y parámetros más relevantes de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM, para así poder determinar un modelo simplificado de red que permita evaluar su desempeño.

### 1.1 RED WDM

En la actualidad, las redes por Multiplexación de Longitud de Onda (WDM - Wavelength División Multiplexing) se clasifican en WDM Densamente Espaciadas (DWDM- Dense Wavelength División Multiplexing) y en WDM Ampliamente Espaciadas (CWDM- Coarse Wavelength División Multiplexing); definidas por el estándar ITU-T G.694.1 [14] y G.694.2 [16], teniendo en cuenta el tipo de aplicación, espaciamiento entre canales, ventanas utilizadas, canales por fibra, capacidad por canal, distancias típicas y costos, tabla 1.1.

CARACTERÍSTICAS	CWDM	DWDM MAN / WAN	DWDM Largo Alcance
Espaciamiento de los Canales	20 nm (2500GHz)	0.8 nm (100GHz)	0.4 nm (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	2.5 Gbps	10 Gbps	10 – 40 Gbps
Distancias Típicas	Hasta 80Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

Tabla 1.1. Parámetros típicos de una red WDM [11]. Leyenda: la banda S (1460 -1530 nm), la banda C (1530 -1565 nm), y la banda L (1565 -1625 nm) [106].

Algunas de las características principales que presenta la tecnología CWDM son su bajo costo de implementación, consumo de potencia y requerimiento en el espaciamiento de los canales; sin embargo, limitantes fundamentales como su baja capacidad y poco rango de operación, han llevado a la tecnología DWDM constituirse como la más utilizada hoy en día en redes WDM [32]. La recomendación ITU-T G.694.1 [16] define la utilización de las ventanas para DWDM desde los 1525nm a los 1565nm, así como espaciamientos típicos entre canales de 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) y 1.6nm (200GHz) con velocidades de transmisión de datos del orden de los 2.5Gb/s a los 40Gb/s. El trabajo de grado se desarrolla en un contexto de red DWDM MAN/WAN, tabla 1.1, a una velocidad de 10 Gbps, con un espaciamiento de canales de 100 GHz y con distancias de cientos de kilómetros. En las literaturas: 2-13, 25, 28, 29 y 35, cuando se habla de redes WDM, se hace referencia implícitamente a redes DWDM; el trabajo de grado utiliza la misma connotación de ahora en adelante.

El esquema modular de una red WDM, fig. 1.1, se compone de transmisores (Tx), Multiplexor (Mux), Canal óptico, Demultiplexor (Demux) y Receptores (Rx). La explicación detallada de cada uno de los componentes mencionados anteriormente se muestra en los anexos A.



Figura 1.1. Esquema modular de una red WDM [33].

Las Topologías (arquitecturas) de redes WDM, se basan en muchos factores que incluyen tipos de aplicaciones, protocolos, distancias, modelos de acceso y sistemas de protección. Las dos principales topologías de redes WDM son [65]:

- **Topología punto a punto:** Utilizada para redes Long-Haul; cuentan con pocos puntos de inserción y extracción en la red, por tanto no son necesarios los OADM (Multiplexor add/drop óptico). Se caracterizan por canales de alta velocidad (10 a 40Gbps), por su alta integridad, confiabilidad y su rápida restauración.
- **Topología en anillo:** Es la más común en áreas metropolitanas. La fibra en anillo puede contener sólo cuatro (4) canales y típicamente menos nodos que canales, la velocidad por canal está en el rango de 622 Mbps a 10 Gbps por canal. A través del empleo de OADMs, se hace la extracción e inserción de longitudes de onda en forma transparente. Los nodos de esta arquitectura en anillo tienen acceso a los elementos de red, tales como routers, switches y servidores, con la subida y bajada de canales de longitudes de onda en el dominio óptico.

Basado en la recolección de diferentes características de red, concernientes a varios operadores de telecomunicaciones nacionales [32], se especifica que la topología más implementada en redes comerciales es la topología en anillo. Para la definición del modelo simplificado de red, se toma un par de nodos (topología punto a punto) de una topología en anillo y se asume que los pares de nodos restantes tienen separaciones iguales, por lo tanto presentan comportamientos similares.

### 1.1.1 Fibra óptica principal

Existen dos categorías generales de fibra óptica, la Fibra Multimodo (MMF - Multiple Mode Fiber) y la Fibra Monomodo (SMF- Single Mode Fiber) [1,32,29,34]; la MMF presenta una disparidad en cuanto al tiempo de llegada de los modos del rayo de luz, este fenómeno es conocido como dispersión modal. La dispersión modal es la causa de una señal de calidad pobre en la recepción y que limita la distancia de transmisión; esta es la razón por la que la MMF no se usa en aplicaciones de área extendida [27], por tal motivo, el desarrollo del trabajo de grado utiliza la SMF.

En la figura 1.2, cada color de línea representa el tipo de fibra monomodo, la línea de color rojo representa la Fibra Modo Simple Estándar (SSMF- Standard Single-Mode Fiber) o G.652, la de color azul las Fibras de Dispersión Desplazada No Cero (NZ-DSF - Non Zero-Dispersion Shifted Fiber) o G.655 y la de color verde la Fibra de Dispersión Desplazada (DSF - Dispersion Shifted Fiber) o G.653. Los valores típicos de Dispersión (D - Dispersion) en función de la longitud de onda, muestran como el valor de la D depende de la ventana de operación y el tipo de fibra monomodo. Los valores de atenuación de la fibra G.652, y G.655 son muy similares en la ventana C, donde la atenuación es mínima; a pesar de que la fibra G.655 tiene valores de CD menores en comparación a la G.652, fig. 1.2, el costo por km de fibra G.655 es mayor; por tal motivo, la fibra G.652 muestra una mayor implementación a

nivel comercial en redes WDM [3,4,7,8,24]; está es la razón por la cual, el desarrollo del trabajo de grado utiliza la fibra G.652 o SSMF.

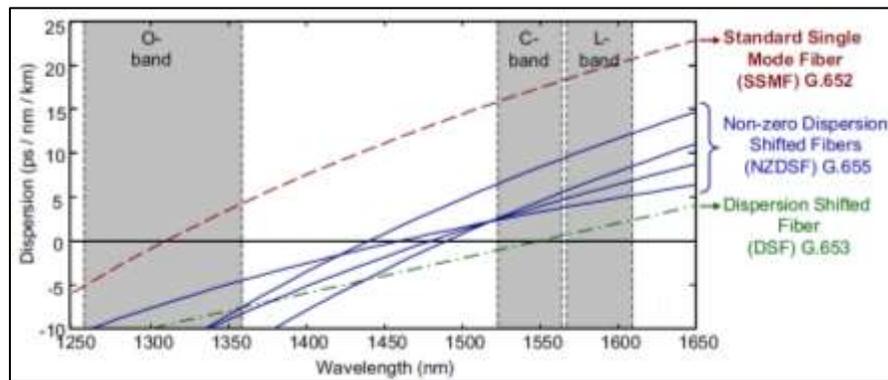


Figura 1.2. Dispersión en función de la longitud de onda para los tipos de fibra monomodo más comunes [19].

La SSMF que presentan una mayor implementación a nivel comercial es la fibra Corning SMF-28, la cual cumple con el estándar de fabricación ITU-T G.652.B [22,26], que especifica entre otros, que el valor del coeficiente de atenuación sea menor o igual a 0.35 dB/km. Basado en las características geométricas, mecánicas y los atributos de diferentes fabricantes [60,61], se especifica la tabla 1.2.

ATRIBUTO	DETALLE	VALOR
Diámetro de campo modal	Rango de valores nominales	8.6 - 9.5 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 0.06 \mu\text{m}$
Diámetro de revestimiento	Nominal	125 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Atenuación	1310 nm	$\leq 0.35 \text{ dB/km}$
	1550 nm	$\leq 0.25 \text{ dB/km}$
PMD	Valor de diseño para enlace	$0.06 \text{ ps/km}^{1/2}$
	Máximo de Fibra Individual	$0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$
Coefficiente de dispersión cromática	1310 nm y 1550 nm	$17 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$
Longitud de onda de dispersión cero ( $\lambda_0$ )	$1301.5 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1321.5 \text{ nm}$	1312 nm
Pendiente de dispersión cero ( $S_0$ )	Para un longitud de onda de operación ( $\lambda$ ) entre $1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1600 \text{ nm}$	$\leq 0.090 \text{ ps/nm}^2\text{km}$

Tabla 1.2. Parámetros de la Corning SSMF-28 [60,61].

### 1.1.2 Formatos de modulación

Los esquemas de modulación por Encendido Apagado (OOK - On Off Keying), por Deslazamiento de Fase Diferencial (DPSK – Differential Phase Shift Keying) y por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (DQPSK - Quadrature Phase Shift Keying), al igual que, los patrones de código de línea Retorno a Cero (RZ – Return to Zero) y No Retorno a Cero (NRZ – Non Return to Zero), se presentan como los formatos de modulación con mayor acogida en redes WDM comerciales a velocidades superiores de 2.5 Gbps.

El formato de modulación NRZ-OOK es el formato de modulación dominante en redes WDM comerciales con velocidades superiores a 2.5 Gbps y con Modulación de Intensidad/ Detección Directa (IM/DD –Intensity Modulation / Direct Detection), debido a que requiere un ancho de banda relativamente pequeño comparado con RZ-OOK [32,74], estos no son sensibles al ruido de fase del láser en comparación al esquema de modulación por desplazamiento de fase (PSK – Phase Shift Keying) [58,105], tiene una configuración simple tanto para el transmisor como para el receptor [32,46,58,74], por lo que resulta económico desplegarlo comercialmente; sin embargo, debido a que la modulación se hace en intensidad sufre una severa atenuación en largas distancias y una baja tolerancia a la dispersión en relación a otros formatos de modulación de fase [32,58].

El esquema de modulación DPSK, independiente al patrón de código de línea, presenta una configuración en el transmisor más compleja con respecto a OOK [32,105], es altamente tolerante al efecto de ruido de fase del láser (FWHM - Full Width at Half Maximum) contribuyente a efectos no lineales [32,46,56,58,74,75] y obtiene distancias del orden de los 180 Km mediante la implementación de un solo dispositivo de amplificación, sin la necesidad de requerir técnicas de compensación para la dispersión cromática en dicho tramo [32,46,56,58], es decir, presenta una tolerancia a la dispersión superior. Por tales razones, NRZ-DPSK y RZ-DPSK se establecen como formatos de modulación atractivos para redes WDM comerciales con velocidades superiores a 2.5 Gbps [32].

Por último, DQPSK duplica la capacidad total de la red y muestra una mejora significativa en la distancia con un solo amplificador [75,105]; sin embargo, presenta una fuerte dependencia con el FWHM [58] y con la potencia de transmisión (contribuyentes a efectos no lineales) [32,56,58], sin dejar de lado su complejidad en configuración e incrementos de costo inherente a la cantidad de elementos requeridos en el transmisor [32,54,56,58].

En cuanto a los patrones de código de línea, NRZ consume un menor ancho de banda y un mínimo de potencia pico óptica por intervalo [3], sin embargo, en el rango de velocidades de 2 a 10 Gbps se ha demostrado que el patrón de código de línea RZ ofrece ciertas ventajas sobre NRZ [32,56,74,75,105], ya que tiende a ser más robusto frente a la CD y otros tipos de degradaciones [104,109].

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en las investigaciones anteriormente mencionadas, se pudo determinar que el patrón de código de línea NRZ es menos robusto frente a la CD y que los esquemas de modulación OOK y DPSK se caracterizan por presentar una mayor implementación en redes WDM a 10 Gbps. Por tales motivos, el desarrollo del trabajo de grado se fundamenta en que NRZ-OOK y NRZ-DPSK, son los formatos de modulación más utilizados en implementaciones comerciales WDM a 10 Gbps.

### **1.1.3 Amplificador Óptico Dopado con Erbio (EDFA)**

Los amplificadores ópticos más empleados en redes WDM comerciales son los EDFAs, estos proveen una solución a las pérdidas por atenuación introducida por la fibra óptica, presentan un funcionamiento independiente al formato de modulación y tienen un amplio ancho de banda, por lo que amplifica varias longitudes de onda simultáneamente.

En la figura 1.3 es notorio que para potencias típicas de entrada de -10, -20 y -30 dBm, el máximo de ganancia se alcanza alrededor de los 1530-1535 nm y la respuesta más plana se presenta alrededor de los 1550-1555 nm [10], lugar donde la atenuación de la fibra SMF es más baja. Por otra parte, ganancias altas representan un aumento del piso de ruido, generando efectos que degradan la señal, razón por la cual los EDFAs comerciales [10] figuran con ganancias Onominales alrededor de los 20 dB, tabla 3. En este orden de ideas, el trabajo de grado se desarrolla en la banda C en el rango de 1550-1555 nm [10].

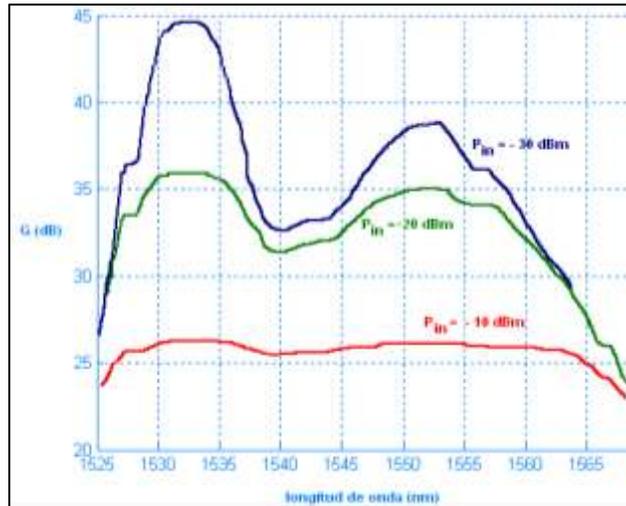


Figura 1.3. Representación de la ganancia (dB) de un EDFA respecto a la longitud de onda (nm) [10]. Cada color de línea representa una potencia de entrada ( $P_{in}$ ) diferente, línea color azul  $P_{in} = -30dB_m$ , línea color verde  $P_{in} = -20dB_m$ , línea color rojo  $P_{in} = -10dB_m$ .

Amplificador	Código	Ganancia (dB)	Potencia de salida (dBm)
Amplificador de una etapa	SSA 22/18	17-27	18
Amplificador de doble etapa	DSA 22/18	17-27	18
Amplificador de una etapa	SSA 22/20	17-27	20.5
Amplificador de doble etapa	DSA 22/20	17-27	20.5
Amplificador de doble etapa	DSA 29/20	24-34	20.5

Tabla 1.3. Amplificadores EDFA comerciales [10].

La ecuación 1.1, permite determinar la máxima distancia del tramo de fibra óptica, que puede ser amplificada mediante la utilización de los EDFAs.

$$G = \alpha D \tag{1.1}$$

- $G$ : Ganancia del amplificador EDFA
- $\alpha$ : Constante de atenuación que introduce la fibra óptica
- $D$ : Distancia

#### 1.1.4 Dispersión Cromática (CD)

En la figura 1.4, se observa la clasificación general de los efectos lineales en efectos de pérdidas y efectos de dispersión. Los efectos de dispersión, fig. 1.5, están sujetos a la Dispersión Cromática (CD - Chromatic Dispersion) y Dispersión de Modo por Polarización (PMD - Polarization Mode Dispersion). El desarrollo del trabajo de grado se enmarca en los efectos lineales, justamente en los efectos de

dispersión y en particular en la dispersión cromática, se dejará para posteriores estudios la dispersión por modo de polarización.



Figura 1.4. Clasificación de los efectos lineales [20].

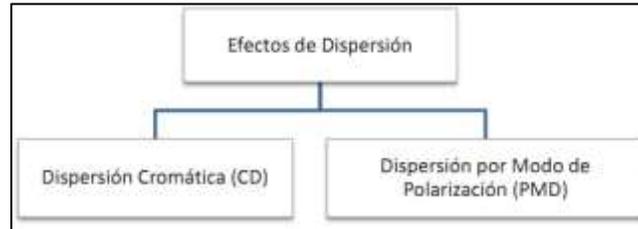


Figura 1.5. Clasificación de los efectos de dispersión [20].

Matemáticamente los efectos de la dispersión se consideran a través de la expansión en series de Taylor de la constante de propagación o número de onda (parámetro  $\beta$ ) en función de la frecuencia angular ( $\omega$ ) [13]:

$$\beta(\omega) = \frac{\omega n(\omega)}{c} = \beta_0 + \beta_1 \Delta\omega + \frac{1}{2} \beta_2 \Delta\omega^2 + \frac{1}{6} \beta_3 \Delta\omega^3 + \dots + \frac{1}{n!} \beta_n \Delta\omega^n \quad (1.2)$$

Donde

- $\omega$ : frecuencia angular óptica.
- $n(\omega)$ : índice de refracción dependiente de la frecuencia.
- $c$ : velocidad de la luz en el vacío.
- $\Delta\omega$ : diferencial de frecuencia entre la banda lateral única y la frecuencia central.
- $\beta$ : constante de propagación o número de onda.

Los parámetros  $\beta_n$  representan la n-ésima derivada de  $\beta$ , descritos como [13]:

- $\beta_0$ : es la envolvente de la velocidad de fase  $v_p$  de la portadora óptica ( $\omega_0$ ), donde  $v_p$  es definida como [13,15]:

$$v_p = \frac{\omega_0}{\beta_0} = \frac{c}{n(\omega_0)} \quad (1.3)$$

- $\beta_1$ : determina la velocidad de grupo  $v_g$ , la cual es la velocidad a la que viaja la onda, constituida por una portadora modulada por la señal de información (envolvente) dentro de la guía de onda. En otras palabras, es la velocidad a la que se propaga la envolvente y consecuentemente, el valor de la velocidad con la que se transmite la información [10,13]. La  $v_g$  está relacionada con  $\beta$  de la siguiente manera:

$$v_g = \frac{1}{\beta_1} = \left( \frac{d\beta}{dw_{w=w_0}} \right)^{-1} \quad (1.4)$$

La dependencia de  $\beta_1$  con la frecuencia, se debe a que cada longitud de onda que compone la señal óptica que viaja en la fibra se propaga con una velocidad de fase diferente [13].

- $\beta_2$ : es conocida como la dispersión de la velocidad de grupo (GVD - Group Velocity Dispersion) y es la derivada de la velocidad de grupo  $v_g$  con respecto a la frecuencia, por lo tanto,  $\beta_2$  muestra claramente la dependencia de la frecuencia con la velocidad de grupo [15,13,17]. Esto significa que diferentes componentes de frecuencia a lo largo de la propagación de la fibra óptica viajan con distintas velocidades, lo cual origina la Dispersión (D - Dispersion). La fibra óptica expuesta a  $\beta_2 > 0$  presenta dispersión normal y para  $\beta_2 < 0$  dispersión anómala [10,17]. En la práctica, un factor más común para representar la CD en la fibra óptica es el factor de D, con unidades  $\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$  que representa el retraso o incremento de tiempo (en ps) para una fuente con una anchura espectral de 1 nm que viaja en 1 kilómetro de la fibra [15]. Este factor es representativo para velocidades mayores a 10 Gbps y se relaciona con  $\beta_2$  de la siguiente manera [13]:

$$D = -\left( \frac{2\pi c}{\lambda^2} \right) \beta_2 \quad (1.5)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de operación.

- $\beta_3$ : como derivada de  $\beta_2$ , representa la pendiente de la dispersión (S) y es significativa para velocidades superiores a 40 Gbps, relacionada de la siguiente manera [13]:

$$S = \frac{dD}{d\lambda} = \left( \frac{2\pi c}{\lambda^2} \right) \beta_3 + \left( \frac{2\pi c}{\lambda^3} \right) \beta_2 \quad (1.6)$$

El desarrollo del trabajo de grado se fundamenta en compensar la dispersión de segundo orden ( $\beta_2$ ), razón por la cual, la CD se enmarca en un contexto comercial de red WDM a 10 Gbps.

Los efectos de dispersión<sup>1</sup> cromática de los pulsos son linealmente dependientes a la longitud del enlace y cuadráticamente dependientes a la velocidad de transmisión de datos [32], convirtiéndose en una cuestión crítica en todas las clases de fibra óptica [21]. En particular, para velocidades superiores a 10 Gbps la CD se convierte en una limitante significativa, mostrando que una red WDM con transiciones de velocidad de transmisión desde 2.5 a 10 Gbps o desde 10 Gbps a 40 Gbps, presente un incremento CD en un factor de 16 [15].

---

<sup>1</sup> La dispersión produce un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos, generando una superposición de los mismos y limitando el alcance de la transmisión, entre otros efectos.

El término CD se refiere al retardo o deformación espectral de un pulso óptico conforme se propaga por el medio óptico; caracterizado por ser dependiente del tipo de fibra, limitando la tasa de bits y la distancia de transmisión [10,15]. Esta deformación espectral tiene como origen el hecho de que las fuentes de luz disponibles no emiten una sola longitud de onda, sino un cierto ancho espectral<sup>2</sup> distribuido alrededor de la longitud de onda central. En virtud a este efecto, la velocidad de grupo es diferente para cada componente espectral emitida por la fuente de luz, lo que trae consigo que cada componente espectral llegue al extremo de la fibra en un tiempo diferente, produciéndose un ensanchamiento de los pulsos [10,11,17].

El resultado de dos efectos diferentes, fig. 1.6, la dispersión del material y la dispersión por guía de onda dan origen a la CD. La dispersión del material se debe a que las diferentes longitudes de onda viajan con distintas velocidades y dependen del coeficiente de reflexión de la fibra [10,35]. La dispersión por guía de onda depende del coeficiente de fase beta, y de que existen componentes que viajan por la cubierta de la fibra [13], lo cual resulta en un retardo de propagación en una o más de las longitudes de onda con relación a las demás; por tanto, se puede deducir que la CD varía como función de la longitud de onda para un material dado [10,35].

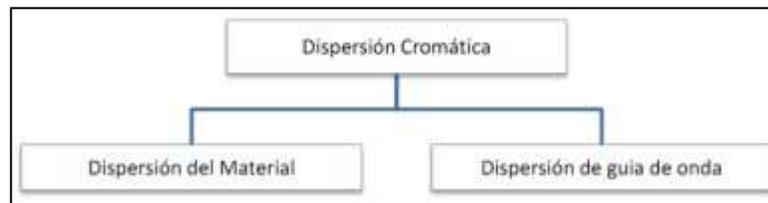


Figura 1.6. Factores de dependencia de la CD.

La CD máxima permisible considerando un Laser Modulado directamente (LMD - Directly Modulated Laser), en función de la velocidad de transmisión o tasa de bits (R) con ausencia de técnicas de compensación, viene dada por [68]:

$$\Delta t = \frac{1}{4R} \quad (1.7)$$

El Ensanchamiento del pulso con ausencia de técnicas de compensación para la CD, en función de la constante de dispersión de la fibra óptica ( $D(\lambda)$ ), el ancho espectral de la fuente óptica ( $\Delta\lambda$ ) y de la longitud de la fibra óptica ( $L$ ), viene dada por [68,108]:

$$\Delta t = LD(\lambda)\Delta\lambda [ps] \quad (1.8)$$

La ecuación 1.8, en función de  $L$  y  $D(\lambda)$  viene dada por [108]:

$$\Delta t = LD(\lambda) [ps/nm] \quad (1.9)$$

<sup>2</sup> El ancho espectral es una medida de la extensión de la longitud de onda de un espectro. Se utiliza para determinar la anchura óptica de las fuentes de luz.

Debido a la dispersión de los pulsos, a medida que se propagan por la fibra óptica, se busca por medio de las técnicas de compensación: visualizar, analizar y principalmente compensar la CD [24]:

- Por tramo.
- Residual del span.
- Residual acumulada al final del enlace.

## 1.2 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD

Las técnicas de compensación ópticas para la CD, también son llamadas técnicas de compensación en línea, debido a que son aplicadas a lo largo del trayecto de fibra óptica (canal óptico), figura 1.7. Estas técnicas están enmarcadas en una temática conocida como Gestión de Dispersión Óptica (ODM – Optical Dispersion Management), que tiene como finalidad compensar la CD por tramo de fibra óptica [30]. Una herramienta esencial en el análisis de la ODM y diseño de redes WDM, es el mapa de dispersión, que muestra la variación de la CD en función de la longitud del enlace óptico [17, 23].

Las técnicas de compensación ópticas para la CD, se pueden optimizar mediante la variación de los parámetros de entrada del pulso<sup>3</sup>, la distancia de amplificación, espaciamiento de entre amplificadores, entre otros [3,4].

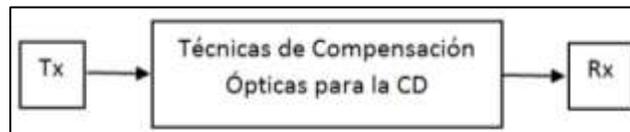


Figura 1.7. Técnicas de compensación ópticas para la CD aplicadas en una red WDM [3].

A continuación, se detallan las características de los elementos que intervienen en las técnicas de compensación ópticas para la CD:

- **Modulo Compensador de Dispersión (DCM - Dispersion Compensation Module):** se coloca antes o después de cada segmento de fibra óptica principal<sup>4</sup>, con el fin de compensar la CD de cada tramo, permitiendo cumplir con la función y objetivo de las técnicas de compensación ópticas para la CD. Para el diseño de redes WDM lo más conveniente es tener un solo DCM entre dos estaciones de amplificación secuenciales [25], fig. 1.8. Para el desarrollo del trabajo de grado se asumen DCMs ideales (lineales) y de bajas pérdidas, una condición que es aproximadamente obtenida en sistemas prácticos (reales) con el uso de amplificadores ópticos.

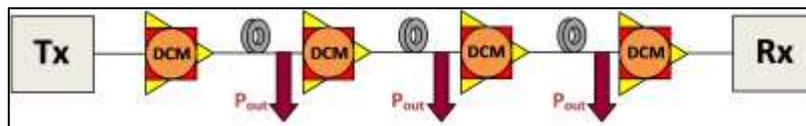


Figura 1.8. Aplicación del amplificador óptico y el DCM [6].

<sup>3</sup> Características del modulador.

<sup>4</sup> Se habla de fibra óptica principal para no entrar en confusiones con la fibra empleada por los DCMs.

La clasificación de los DCMs depende del elemento compensador que se utilice, ya sea Fibras Compensadoras de dispersión (DCF) o Fibras Bragg Grating (FBG). A continuación se dará la explicación de cada uno de ellos, además de sus ventajas y desventajas, para así, determinar que DCM se utiliza para el desarrollo del trabajo de grado:

- **Fibra de Bragg Grating (FBG - Fiber Bragg Grating):** la FBG es un tramo de fibra óptica que hace uso del efecto Bragg<sup>5</sup>, para que las diferentes longitudes de onda que viajan por distintos trayectos permitan que las longitudes de onda más lentas puedan alcanzar a las más rápidas [28]. Este tipo de fibra tiene la propiedad de reflejar selectivamente una banda de frecuencias estrecha, centrada en la longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) [10]. Las FBGs se caracterizan por tener una alta dependencia de la potencia, lo cual se refleja en efectos no lineales significativos; por otro lado, su uso tiene como finalidad compensar la dispersión de tercer orden ( $\beta_3$ ).
- **Fibra Compensadora de Dispersión (DCF – Dispersion Compensating Fiber):** es un tramo de fibra óptica que tienen una dispersión elevada y de signo contrario a la que ha introducido la fibra óptica principal<sup>6</sup> en la ventana de operación; su valor debe ser tal que en un corto intervalo de tiempo compense la dispersión acumulada hasta ese punto; con ello, de tramo en tramo, se espera que la dispersión residual total al final del enlace sea prácticamente nula, aunque la dispersión residual de cada tramo en el sistema no lo sea [11]. La DCF tiene como finalidad compensar la dispersión de segundo orden ( $\beta_2$ ), opera a bajas potencias y muestra efectos no lineales despreciables [21,28]; sin embargo, presenta altas pérdidas por atenuación (0.4 - 0.6 dB) [34], hecho que se soluciona con la combinación de amplificadores ópticos.

Debido a que el objetivo del trabajo de grado es compensar la dispersión de segundo orden, específicamente la CD, se eligen DCMs que utilizan DCFs. Por esta razón, de ahora en adelante cuando se hable de las técnicas ópticas de compensación para CD, inherentemente, se hace referencia a que son implementadas con DCMs en los que interviene la DCF. Los DCMs que se encuentran en el mercado basados en DCFs [59,62-64,70-73], son empleados en sistemas WDM a 2.5 y 10 Gbps en la banda C y L, con fibras ópticas que cumplen con criterios de diseño del estándar ITU-G.652.A/B/C/D. Algunos presentan sistemas conmutados que permiten una compensación de dispersión variable para diferentes longitudes de fibra óptica y muestran bajas pérdidas por inserción y polarización, proveen una optimización de la compensación de la dispersión alrededor 1525 a 1565 nm, entre otros. A continuación, se muestran los valores de los parámetros más relevantes de los DCMs que involucran DCFs, tabla 1.4, y las medidas de dispersión y pérdidas por inserción para diferentes longitudes de fibra SSMF, tabla 1.5

---

<sup>5</sup> En una fibra óptica con redes de difracción el índice de refracción no es uniforme, estas variaciones en el índice provocan la refracción de la luz, conocido como el efecto Bragg.

<sup>6</sup> Se habla de fibra óptica principal con el fin de diferenciarla con la fibra compensadora de dispersión.

Velocidad de grupo de la dispersión [ps <sup>2</sup> /km]	Coefficiente no lineal [W <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> ]	Coefficiente de atenuación [dB/km]	Coefficiente de dispersión [ps/nmkm]	Pendiente de dispersión cero (S <sub>0</sub> ) [ps/nm <sup>2</sup> km]
102	6.0	0.50	-80	-1,84 ≤ S <sub>0</sub> ≤ -3,68

Tabla 1.4. Valores típicos de los parámetros de la DCF [21,64].

Longitud (km)	Medidas de Dispersión (ps/nm)			Perdidas por inserción (dB)
	1530 nm	1550 nm	1569 nm	
20	-312 ± 8	-335 ± 8	-356 ± 8	3.0
40	-623 ± 16	-669 ± 16	-713 ± 16	4.5
60	-935 ± 24	-1004 ± 24	-1069 ± 24	6.0
80	-1246 ± 32	-1339 ± 32	-1426 ± 32	7.5
100	-1558 ± 40	-1673 ± 40	-1782 ± 40	9.0

Tabla 1.5. Medidas de dispersión y de pérdidas por inserción de los DCMs comerciales [62-64,70-73].

La ecuación (1.10) se utiliza para encontrar la longitud de la DCF ( $L_{DCF}$ ), conociendo la longitud de la fibra óptica principal ( $L_{FOP}$ ), el valor de la constante de dispersión para la fibra óptica principal ( $D_{FOP}$ ) y el valor de la constante de dispersión para DCF ( $D_{DCF}$ ) basado en la ventana de trabajo de la red WDM. Las constantes de dispersión dependen de la ventana de trabajo.

$$D_{DCF}L_{DCF} + L_{FOP}D_{FOP} = 0 \quad (1.10)$$

La dispersión del pulso en función de la longitud de las fibras ( $L_{FOP}$ ,  $L_{DCF}$ ), las constantes de dispersión ( $D_{FOP}(\lambda)$ ,  $D_{DCF}(\lambda)$ ) y el ancho espectral del transmisor ( $\Delta(\lambda)$ ) se representa como:

$$\Delta t = L_{FOP}D_{FOP}(\lambda)\Delta(\lambda) + L_{DCF}D_{DCF}(\lambda)\Delta(\lambda) \quad (1.11)$$

Para el diseño de redes WDM prácticas (reales), lo más conveniente es tener un solo tramo de DCF entre dos EDFAs secuenciales [4]; también se ha encontrado que alternando el orden del tramo de DCF (antes y/o después del tramo de fibra óptica principal) se presenta una mejora considerable en la apertura de la penalidad del ojo para amplificadores con espaciamentos mayores o iguales a 120 km [4,24].

Teniendo en cuenta el lugar u orden donde se coloque el tramo de DCF en el trayecto de fibra óptica principal, las técnicas de compensación óptica para la CD se clasifican en técnicas de post-compensación óptica, pre-compensación óptica y compensación simétrica (pre y post) óptica. El trabajo de grado se fundamenta en las técnicas de pre-compensación y post-compensación descritas en las secciones 1.3.1 y 1.3.2 respectivamente, se deja para posteriores estudios el análisis del desempeño de la técnica de compensación simétrica para la CD.

### 1.2.1 La técnica de post-compensación óptica para la CD

La técnica de post-compensación óptica, fig. 1.9, consiste en colocar un tramo de DCF después del tramo de fibra óptica principal, para poder compensar la CD acumulada en cada tramo. En esta técnica los pulsos son ensanchados y presentan un decremento en el nivel de la potencia [4], siendo dicho nivel más bajo que en el caso de la técnica de pre-compensación óptica; debido a esto, la técnica de post-compensación óptica muestra efectos no lineales más significativos.

En el mapa de dispersión para la técnica de post-compensación óptica, fig. 1.10, se observa cómo el tramo de fibra óptica principal muestra un incremento de CD, de tal manera que al final del mismo tramo se expone un valor positivo máximo de CD; con la introducción del tramo de DCF, la CD se va disminuyendo, por consiguiente, la CD residual al final de tramo muestra un nivel significativamente reducido.

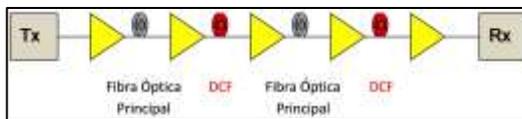


Figura 1.9. Técnica de post-compensación óptica para la CD [2].

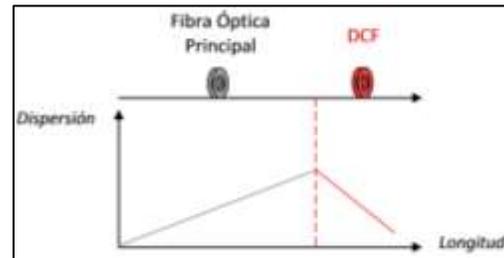


Figura 1.10. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD [12].

### 1.2.2 La técnica de pre-compensación óptica para la CD

La técnica de pre-compensación óptica, fig. 1.11, consiste en colocar un tramo de DCF antes del tramo de fibra óptica principal, con el fin de generar un valor de CD negativo que permita compensar la CD acumulada por cada tramo. Esta técnica conduce a una compresión del pulso; además de presentar un decremento en el nivel de potencia [4], siendo el nivel de potencia de la señal a la entrada de la DCF más alto que en el caso de la técnica de post-compensación óptica. Por esta razón, la técnica de pre-compensación óptica presenta efectos no lineales menos significativos con respecto a la técnica de post-compensación óptica.

En el mapa de dispersión para la técnica de pre-compensación óptica, fig. 1.12, se observa que el tramo de DCF muestra un incremento de la CD de forma negativa, de tal manera que al final del mismo tramo se presenta un valor negativo máximo. A partir de ese valor y con la presencia del tramo de fibra óptica principal, se expone un incremento de la CD, de tal forma que cuando el pulso llega al receptor se presenta una dispersión residual significativamente reducida.



Figura 1.11. Técnica de pre-compensación óptica para la CD [2].

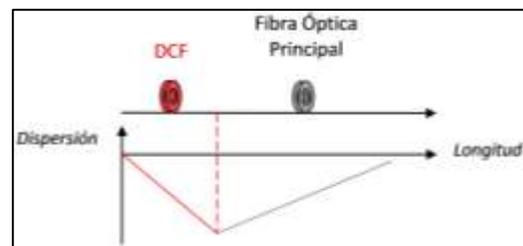


Figura 1.12. Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD [12].

### 1.3 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ELECTRÓNICAS PARA LA CD

Las técnicas de compensación electrónicas para la CD, están enmarcadas dentro de una temática conocida como Compensación Electrónica de la Dispersión (EDC - Electronic Dispersion Compensation), en donde el Procesamiento Digital de Señales (PDS - Digital Signal Processor) y la ecualización electrónica, tienen como funcionalidades:

- Eliminar la CD residual acumulada al final del enlace, que las técnicas de compensación ópticas para la CD no pudieron compensar [7].
- Reducir los costos de la instalación de DCFs y amplificadores secundarios [7].
- Simplificar el despliegue y reconfiguración de la red WDM, ya que cada canal descubre y optimiza su propia CD, mediante procesamiento digital de señales y ecualización [7].
- Reducir las deficiencias lineales del canal causadas por filtros ópticos [7].
- Presentar una mayor tolerancia a las deficiencias del transmisor [13].
- Mostrar un mejor desempeño del sistema al usar fibras con alta dispersión [8].

El límite de la CD para un sistema con fibra estándar G.652 y EDC está denotado como  $(\beta_2 L)_{3dB}$ <sup>7</sup>. Por otra parte, un sistema NRZ sin técnicas de compensación de dispersión presenta un [55]:

$$(\beta_2 L)_{3dB} = 0.12T^2 \quad (1.12)$$

La EDC está definida bajo la recomendación ITU-T G.959.1 [77], en la cual se muestra información concerniente a la implementación de redes de largo alcance con fibras de estándar G.652. Para el caso de estudio del presente trabajo de grado, cabe recalcar que una red WDM con EDC a una velocidad de 10Gbps y un patrón de código de línea NRZ, puede compensar cerca de 2400 ps/nm (120 km), obteniendo tasas de BER de  $10^{-12}$  [77]. La EDC, implementada en redes WDM a través de ecualizadores, es ejecutada mediante filtros transversales, diseñados para suprimir características no deseadas del canal, o también, para ajustarse (adaptativos) a variaciones del mismo [78,79]. Las técnicas de compensación electrónica para la CD basada en ecualizadores, muestran mejores prestaciones o beneficios dependiendo de su ubicación y proceso de ecualización [84]:

- **Ubicación:** en cuanto a su ubicación se caracteriza por estar en el lugar del transmisor: técnica de pre-compensación electrónica para la CD, fig. 1.13, en lugar del receptor: técnica de post-compensación electrónica para la CD, fig. 1.14 [37,84], y simultáneamente en el lugar del transmisor y receptor: técnica de compensación electrónica simétrica o ecualización compartida para la CD. Se deja para posteriores estudios el análisis del desempeño de la técnica de compensación electrónica simétrica para la CD en redes WDM, donde su ejecución es justificable, debido a que su implementación requiere modelos matemáticos más avanzados, que se realizan conjuntamente con procesos de estimación para la detección de señales altamente degradadas

---

<sup>7</sup> Es definida como la máxima GVD que puede ser tolerada con 3dB de penalidad de OSNR para una BER de  $10^{-9}$  [55].

por efectos lineales y no lineales, hechos que ocurren a velocidades de 40 Gbps y experimentales de 111Gbps [6,24,37].



Figura 1.13. Técnica de compensación electrónica para la CD aplicada en el lugar del receptor de una red WDM [37].

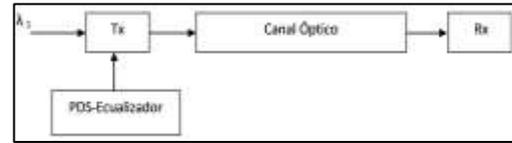


Figura 1.14. Técnica de compensación electrónica para la CD aplicada en el lugar del transmisor de una red WDM [37].

La EDC a diferencia de la ODM, es aplicada en cada uno de los canales a multiplexar en el transmisor, fig. 1.15 (a), o en el caso contrario, en cada uno de los canales a de-multiplexar en el receptor, fig. 1.15 (b) [37].

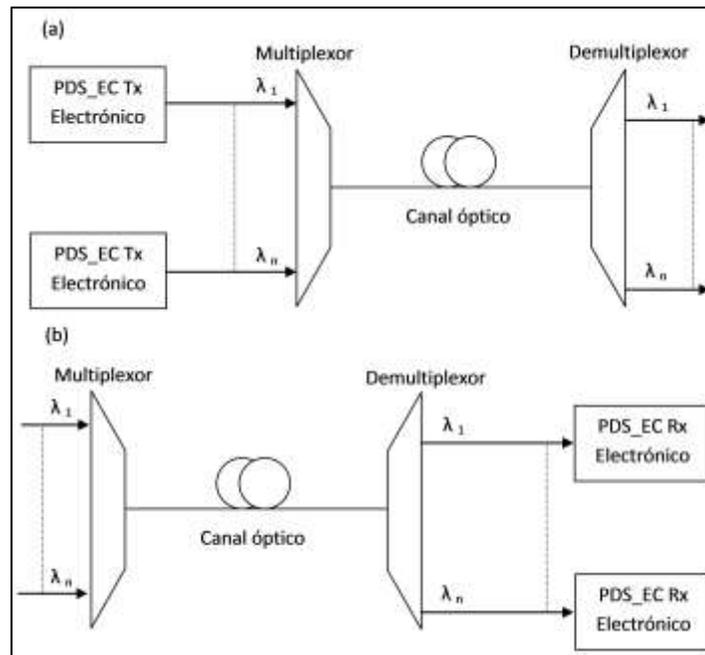


Figura 1.15. Disposición de equalización en una red WDM con (a) una técnica de pre-compensación electrónica para la CD, (b) una técnica de pre-compensación electrónica para la CD. Legenda: PDS\_EC Tx: PDS con equalización en el transmisor. PDS\_EC Rx: PDS con equalización en el receptor [37].

- **Proceso de Equalización:** se clasifican mediante procesos<sup>8</sup> lineales<sup>9</sup> y no lineales<sup>10</sup>, como se muestra en la figura 1.16. Los equalizadores lineales se clasifican en Equalizador basado en proceso Forzador de paso por Cero (ZFE - Zero Forcing Equalization), Equalizador Feed Forward (FFE - Feed Forward Equalizer) y Equalizador Lineal basado en Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE-LE – Minimizes Mean Square Error – Linear Equalizer). Los equalizadores no lineales se clasifican en Equalizador de Decisión Feedback

<sup>8</sup> Conjunto de procedimientos coordinados que se ejecutan bajo circunstancias específicas con un fin determinado.

<sup>9</sup> Los procesos lineales representan sistemas que obedecen a las propiedades de escalado (homogeneidad) y superposición (aditiva).

<sup>10</sup> Los procesos no lineales representan sistemas cuyo comportamiento no es expresable como la suma de los comportamientos de sus descriptores, y no está sujeto a las propiedades de homogeneidad y superposición.

(DFE - Decision Feedback Equalizer) y Ecuador de Secuencia de estimación de Máxima Probabilidad o Verosimilitud (MLSE – Maximun Likelihood Sequence Estimation) [37,38].



Figura 1.16. Procesos lineales y no lineales para la ecualización del canal óptico [37,38].

Un ecualizador lineal ZFE, fuerza a la ISI a reducirse a cero para cada decisión de símbolo. Este tipo de ecualizador aumenta el ruido, degradando así el desempeño del sistema [37,38,44]. El ecualizador lineal FFE distorsiona la señal mediante una estructura fraccionalmente espaciada por periodos de símbolo, con el fin de mitigar la ISI [36,44]. Por otra parte, un ecualizador lineal basado en MMSE, minimiza el error entre el símbolo recibido y el símbolo transmitido sin aumentar el ruido [36,43].

La ecualización no lineal se hace necesaria cuando la distorsión del canal es bastante severa para la ecualización lineal [37,38]. Un ecualizador no lineal basado en el proceso DFE, hace uso de previas decisiones de símbolos para estimar el símbolo actual mediante un detector<sup>11</sup>. Un ecualizador basado en el proceso MLSE, se puede efectuar mediante el algoritmo de Viterbi<sup>12</sup> [6,36], el cual es altamente eficiente y directamente dependiente al formato de modulación de la señal [37].

Usualmente, los procesos de ecualización lineales y no lineales suelen combinarse para cumplir con parámetros de desempeño especificados por una red WDM [38,44]. Es importante resaltar que los ecualizadores basados en los procesos DFE y FFE, son estudiados a fondo en el campo de la EDC, presentan bajos costos y mediana complejidad en la arquitectura hardware/software [37,40,41,43,44,84]; por esta razón, el trabajo de grado se enmarca en la ecualización lineal y no lineal basada en los procesos DFE y FFE, con la posibilidad de ser combinados con procesos FZ y MMSE.

Las técnicas de compensación electrónicas buscan atacar la CD conociendo las características de la señal y la distorsión de fase del canal [6,18,40,42,44,49,55,79,80]. Por tal motivo, en la sección de ecualizadores transversales, se detalla la representación de la señal y distorsión de fase del canal, con el fin de especificar el comportamiento de los elementos que intervienen en las técnicas de compensación electrónicas para la CD.

Dado que la fibra monomodo es afectada por la distorsión de fase, se hace necesaria la ecualización, la cual es tratada, mediante procesamiento de la amplitud o fase muestreada, para alterar sus características [37,84]. La respuesta al impulso de la fibra óptica debe ser obtenida con el fin de especificar el sistema de

<sup>11</sup> La no linealidad se debe al uso de este componente.

<sup>12</sup> Este algoritmo se realiza mediante arboles de decisión o conjuntamente con diagramas de trellis, cuyas ramas corresponden a secuencias de bits con máxima probabilidad de ocurrencia.

ecualización, para de esta manera, presentar una deducción analítica de la distorsión de fase del canal. Considerando que la respuesta al impulso del canal es  $y(t)$ , la transformada  $z$  de la respuesta al impulso, con un tiempo de muestreo igual al periodo de bit está dada por [37]:

$$y(nT) = [y_0 y_1 \dots y_g \dots 0] \quad (1.13)$$

$$y(z) = y_0 + y_1 z^{-1} \dots y_g z^{-g} \quad (1.14)$$

$$n \geq 2g + 1 \quad (1.15)$$

Donde

- $n$ : Número de taps del filtro D, especificado en el anexo C.
- $g$ : Número de taps del FFE, especificado en el anexo C.

En el anexo C, se especifica la descripción y desarrollo matemático del canal, cuando se produce una distorsión de fase.

A continuación, se detallan las características de los elementos que intervienen en las técnicas de compensación electrónica para la CD:

- **Ecualizadores Transversales:** cuando se transmiten señales digitales a través de un canal analógico, sólo importan los valores que alcanza dicha señal en tiempos específicos (instantes de muestreo). Esta es la base de los ecualizadores o filtros transversales. Su estructura tiene una construcción sistemática, en la que se va avanzando de izquierda a derecha, fig. 1.17, añadiendo en cada paso un nuevo retardo con su correspondiente coeficiente [18,44,49]. Las etapas de retardo son conocidas como taps<sup>13</sup> [18,42,84,102] y los coeficientes como pesos<sup>14</sup> del tap [44,49,102]. A esta estructura se le llama filtro transversal y es implementable tanto por software como por hardware [44,94].

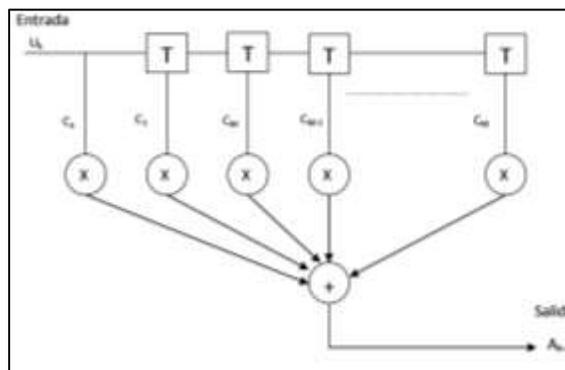


Figura 1.17. Ecualizador lineal transversal [44].

El objetivo del ecualizador transversal es eliminar la ISI que se produce como consecuencia de la distorsión de amplitud y de fase introducida por el medio de transmisión. El tipo más común de ecualizador, utilizado en la práctica para reducir

<sup>13</sup> El número de taps hace referencia a la cantidad de memoria necesitada (registros digitales), la cantidad de retardo que se aplica a una señal y el filtrado que puede hacerse; estos son representadas como unidades de retardo en función del periodo de bit.

<sup>14</sup> Representan las ganancias que son multiplicadas a cada retardo que se le hace a la señal.

la ISI, es un filtro FIR con coeficientes ajustables  $C_j$ , representado mediante un ecualizador transversal [44,49,94,102]. En la entrada del ecualizador se tiene la señal recibida proveniente de una fuente de transmisión o un canal de comunicación, que está constituida por una secuencia de muestras  $U_k$  afectada por ISI y ruido [44,94]. La salida estimada del ecualizador en el intervalo  $k$ -ésimo está dada por:

$$A_{k-d} = \sum_{j=0}^N c_j u_{k-j} \quad (1.16)$$

- $A_{k-d}$  : Salida estimada por el ecualizador.
- $d$ : Retardo.
- $c_j$ : Coeficientes del ecualizador.
- $u_k$ : Secuencia de entrada al ecualizador proveniente del canal.

La secuencia de entrada  $u_k$  considerando el canal con ISI, fig. 1.18, está dada por:

$$u_k = \sum_{m=0}^L f_m a_{k-m} + n_k, k = 0,1, \dots \quad (1.17)$$

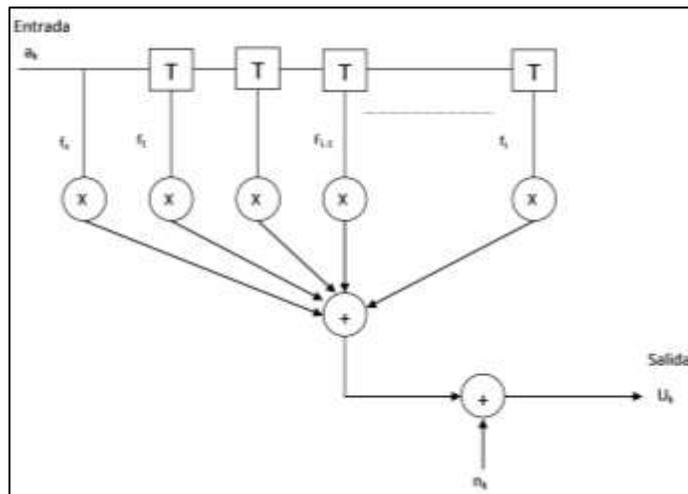


Figura 1.18. Modelo de un canal discreto con ISI [44].

Se observa que la  $k$ -ésima, salida del filtro transversal está dada en función de las muestras pasadas, la muestra actual y las muestras futuras, esto es claro, al hacer el retardo igual a cero ( $d = 0$ ) y manipular la ecuación 1.16 de la siguiente forma [44]:

$$A_{k-d} = \sum_{j=0}^N c_j [f_m a_{k+j-m} + n_{k+j}], k = 0,1, \dots \quad (1.18)$$

$$= \dots + (c_0 f_1 + c_1 f_2 + \dots) a_{k-1} \quad (1.19)$$

Símbolos previos

$$+ (c_0 f_0 + c_1 f_1 + \dots) a_k \quad (1.20)$$

Símbolo actual

$$+(c_1 f_0 + c_2 f_1 + \dots) a_{k-1} + \dots \quad (1.21)$$

Símbolos posteriores o futuros

Téngase en cuenta que las ecuaciones 1.19, 1.20 y 1.21, son la expansión de la ecuación 1.18. La solución matemática, paso a paso al modelo del filtro transversal, se muestra en el anexo D.

- **Ecualizador Feed Forward (FFE):** es un proceso de ecualización lineal, implementado mediante un filtro transversal [42,43,44], que ofrece un procesamiento encaminado a la mitigación de la distorsión de la fase para corregir la ISI. La estructura de un ecualizador FFE, fig. 1.19, consiste de N retardos tap en cascada de la señal muestreada. Paralelamente, la señal es dividida y multiplicada por los coeficientes tap. Estas señales divididas, cuyo tiempo de retardo tap es el periodo de bit, son luego sumadas para entregar la secuencia de muestras procesadas a la salida [37,69,103].

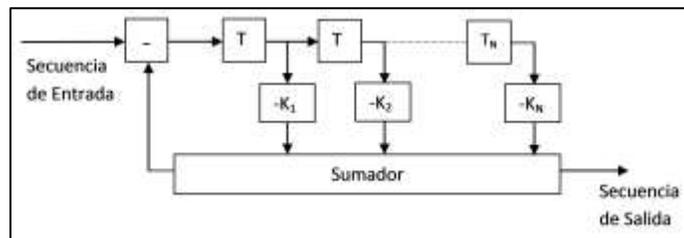


Figura 1.19. Estructura del FFE [37].

- **Ecualizador Feedback de Decisión (DFE):** es un ecualizador no lineal que elimina la ISI causada por símbolos detectados previamente; este ecualizador está constituido por tres secciones, fig. 1.20, la sección feed-forward representada mediante un primer ecualizador lineal FFE (Filtro D), la sección feedback representada mediante un segundo ecualizador lineal FFE (Filtro F), y un slicer<sup>15</sup> [44]. El circuito de decisión puede determinar la amplitud de la señal requerida para realimentar la diferencia de error en la entrada. El FFE es, generalmente, un filtro fraccionalmente espaciado T periodos de bit mientras que el DFE está espaciado a múltiplos de la tasa de símbolo [37,69,103]. Si los taps de la sección feedback se establecen en cero el ecualizador, se denomina un FFE-NL (FFE-No Lineal).

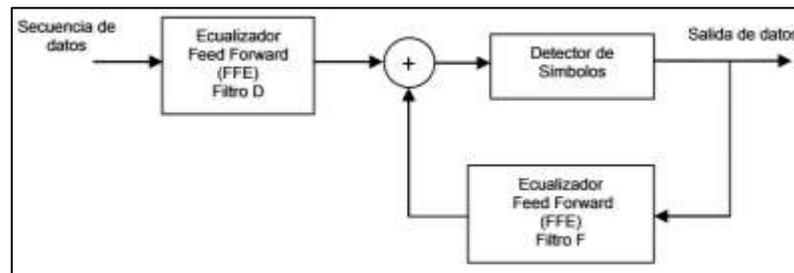


Figura 1.20. Estructura de un DFE [37,38,69,103].

La figura 1.21, muestra la composición de cada bloque de la figura 1.20.

<sup>15</sup> El slicer es un detector de símbolos o circuito de decisión.

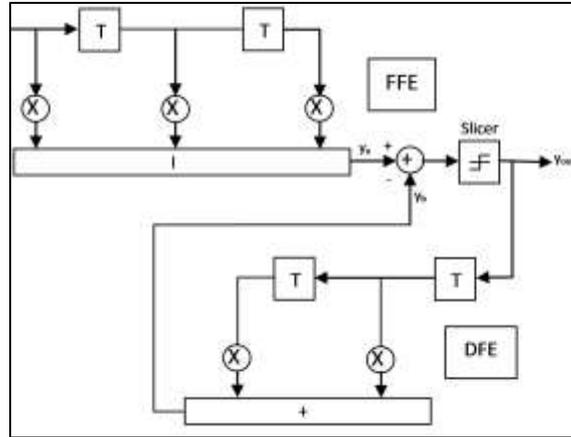


Figura 1.21. Combinación de ecualización FFE, DFE y detección (slicer) [6,37,43,80].

Un DFE trabaja de tal manera que si los valores de símbolos previamente detectados son conocidos, entonces la ISI producida por esos símbolos puede ser cancelada exactamente en la salida del DFE por sustracción de los valores del símbolo anteriores [37,38]. Los coeficientes tap tanto del FFE como del DFE pueden ser ajustados simultáneamente para cancelar la ISI [44,49,88]. El número de taps requerido, refleja la complejidad computacional permisible y el desempeño del ecualizador feedback de decisiones [38].

El espaciamento de los taps a 10 Gbps, para los ecualizadores FFE y DFE, se define como la mitad del periodo de bit (T) [37,50,51,93]:

$$\text{Espaciamento entre taps} = \frac{T}{2} \quad (1.22)$$

Dependiendo de la cantidad de dispersión por compensar, se puede reajustar el diseño de espaciamento entre taps a T/4, sin embargo, se necesitaría mayor número de taps para compensar lo que se puede hacer con unos cuantos taps de T/2. Un espaciamento entre taps de T/8, presenta una alta precisión de compensación de dispersión, pero mayor complejidad computacional debido al número de taps [37,9,93].

Ahora, la relación aproximada entre el número de taps (m), la duración de bit (T) y la dispersión acumulada se presenta de la siguiente forma [37]:

$$\text{Dispersión acumulada [ps]} = m \frac{T}{2} \quad (1.23)$$

Conociendo la dispersión acumulada y la duración de bit (T) de la ecuación (1.23), se puede encontrar el número de taps (m) aproximado de un FFE o DFE de la siguiente manera:

$$m = \frac{2 * \text{Dispersión acumulada [ps]}}{T} \quad (1.24)$$

El número de taps (m) encontrado en la ecuación (1.24), debe ser aproximado al entero mayor o menor en caso de obtener un valor decimal.

Como se ha mencionado, la función del DFE es cancelar la ISI, la cual puede ser de naturaleza pre-cursor<sup>16</sup> y post-cursor<sup>17</sup> [44,88]; la función del FFE, es ayudar a cancelar la ISI pre-cursor; mientras que, la del DFE es cancelar la ISI post-cursor [37,86,88,96], fig.1.22.

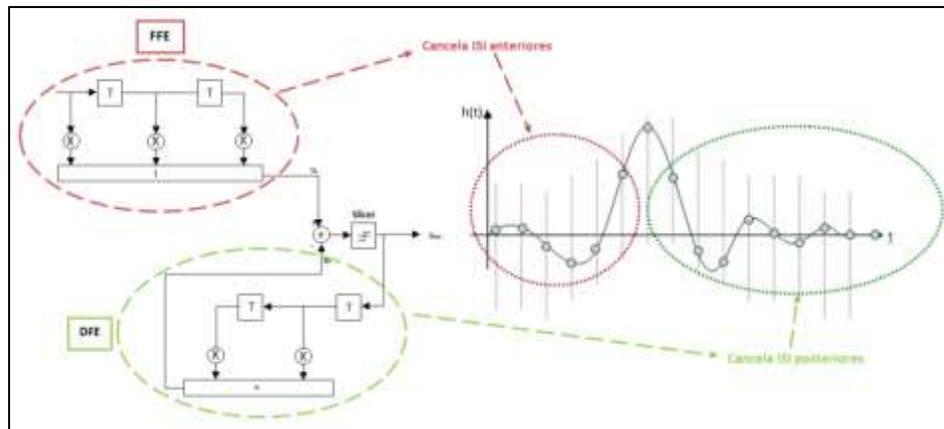


Figura 1.22. Cancelación de ISI pre-cursor e ISI post-cursor [43].

Teniendo en cuenta la ecuación (1.12) con la implementación del DFE a una BER mínima, el límite de dispersión puede ser mejorado a:

$$(\beta_2 L)_{3dB} = 0.23T^2 \quad (1.25)$$

Actualmente, se han sumado un grupo importante de fabricantes de circuitos integrados avalados por la OIF (Optical Internetworking Forum), los cuales implementan en modo hardware y software los ecualizadores lineales FFE y DFE, entre ellos se resalta BROADCOM®, JDS UNIPHASE® y SCINTERA NETWORKS [83,85,99]. Por otra parte, el KIT TMS320C6711™ ofrece una alternativa de diseño controlado por software para ecualizadores lineales y no lineales adaptativos [95]. Adicionalmente, el software de ecualización N5461A Infiniium compatible para osciloscopios de Agilent Technologies, ofrece una alternativa viable para el estudio bajo simulación de los ecualizadores FFE Y DFE [92].

En resumen, las técnicas de compensación electrónica para la CD permiten la mitigación de considerables órdenes de CD, la migración de distancias y velocidades en redes WDM mediante la [37]:

- Integración de PDS para ecualización en el lugar del transmisor, también llamada técnica de pre-compensación, pre-distorsión o pre-ecualización electrónica [41].
- Integración de PDS para ecualización en el lugar del receptor, también llamada técnica de post-compensación o post-ecualización electrónica [37].

### 1.3.1 Las técnicas de post-compensación electrónica para la CD

Las técnicas de post-compensación electrónicas para la CD implementadas en el lugar del receptor, fig. 1.23, se denominan también técnicas de post-ecualización

<sup>16</sup> ISI anterior a la muestra insensible a las variaciones de retardo (cursor).

<sup>17</sup> ISI posterior a la muestra insensible a las variaciones de retardo (cursor).

electrónica. El objetivo de estas técnicas es actuar sobre la CD de la señal transmitida después de recorrer la fibra óptica tal y como se observa en el mapa de dispersión, fig. 1.23. También, es notorio en dicho mapa, que a medida de que la señal se propaga por la fibra óptica se presenta un decremento de potencia, para lo cual se colocan EDFAs a lo largo del trayecto de fibra óptica [6,80].

Gran parte de las redes WDM implementadas a nivel comercial, emplean la Modulación Directa y Detección Directa (IM/DD - Intensity Modulation/Direct Detection) usando Fotodiodo PIN<sup>18</sup> o Fotodiodo Avalancha (APD - Avalanche Photodiode)<sup>19</sup> [87]. Para este tipo de redes, el enfoque más común de EDC emplea la técnica de post-compensación electrónica para la CD basadas en ecualizadores FFE/DFE [93], en donde un FFE con 7 taps y un DFE con 1 tap espaciados  $T/2$  extienden el alcance en un orden de 60 a 100 km [37,39,51,97].

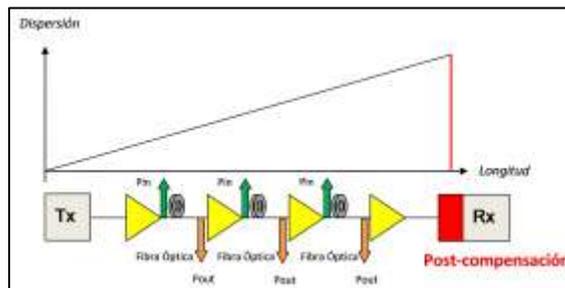


Figura 1.23. Post-compensación electrónica para la CD [6].

Para los receptores convencionales de detección directa, la distorsión lineal que es inducida por la CD en el dominio óptico se transforma en una distorsión no lineal en el dominio electrónico. Esto explica por qué existe un desempeño limitado en los ecualizadores lineales FFE; también, revela por qué técnicas basadas en ecualizadores DFE son más efectivas en combatir la CD en receptores con detección directa [37,39].

En la figura 1.24, se presenta el esquema de un ecualizador DFE posterior a un receptor óptico con dos filtros transversales Feed Forward; uno en lazo abierto<sup>20</sup> (sección izquierda) y otro en lazo cerrado<sup>21</sup> (sección realimentada) [37,39]. Este tipo de esquema es ideal para redes WDM con órdenes de dispersión de alrededor de 2400 ps/nm [78] o su equivalente en distancias entre 80 y 160 km [106]. Según datos técnicos de estudios de redes WDM, los márgenes de distancias mencionados anteriormente son alcanzados por sistemas OOK con una ONSR requerida para una BER de  $5 \times 10^{-4}$  que oscila entre 12 y muy por encima de los 22 dB, en el caso de usar ecualizador FFE, y 12 a 17dB, en caso de usar ecualizador DFE [37,39,90]. En estos términos, el aporte en cuanto al desempeño del DFE frente al FFE es significativo [86], por tal motivo, es imprescindible contar con un

<sup>18</sup> Se llama diodo PIN a una estructura de tres capas, siendo la intermedia semiconductor intrínseco, y las externas, una de tipo P y la otra tipo N (estructura P-I-N que da nombre al diodo). Es sensible a un gran ancho de banda debido a que no tiene mecanismos de ganancia.

<sup>19</sup> La ionización por impacto de átomos del semiconductor y los portadores generados por este, hace que se genere la ganancia de avalancha. La ganancia de un APD tiene influencia sobre el ancho de banda.

<sup>20</sup> Es aquel sistema en que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente.

<sup>21</sup> Son los sistemas en los que la acción de control está en función de la señal de salida.

ecualizador DFE para la técnica de post-compensación electrónica para la CD desarrollada en el trabajo de grado. Es importante resaltar, que este tipo de ecualizador, suele ser combinado con procesos ZF o MMSE para realizar correcciones que permitan lograr ciertos objetivos de desempeño [86]. El desarrollo matemático del proceso ZF y MMSE se muestran en los anexos E y F, respectivamente.

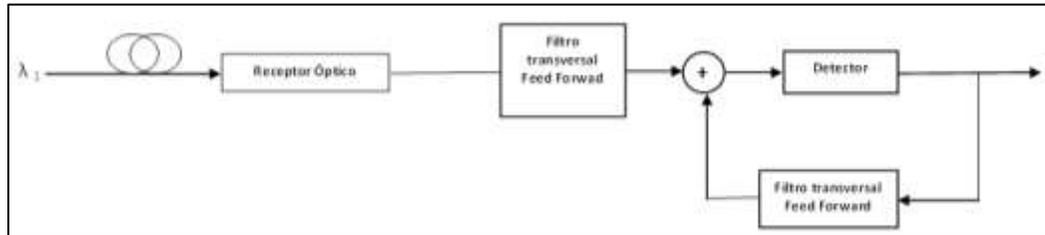


Figura 1.24. Filtro transversal Feed Forward a la entrada y en el lazo cerrado [37].

### 1.3.2 Las técnicas de pre-compensación electrónica para la CD

Las técnicas de compensación electrónicas para la CD implementadas en el lugar del transmisor, fig. 1.25, se denominan también técnicas de pre-compensación, pre-distorsión<sup>22</sup> o pre-ecualización electrónica [37,41]. El objetivo de esta técnica es compensar la CD acumulada al final del enlace, mediante un ecualizador FFE [91]. Dicho proceso de ecualización está orientado a la pre-distorsión de la señal antes de que sea detectada en el receptor como se observa en el mapa de dispersión, fig. 1.25. También es notorio en dicho mapa que a medida de que la señal se propaga por la fibra óptica, se presenta un decremento de potencia, para lo cual se colocan EDFAs a lo largo del trayecto de fibra óptica [6,80]. El respectivo desarrollo matemático de la técnica de pre-compensación electrónica para la CD se muestra en el anexo G. Como se ha indicado en la ecualización, la pre-distorsión en el transmisor puede ser ajustada mediante PDS, sin embargo, la longitud de la fibra y la CD tienen que ser conocidas para llevar a cabo dicho ajuste, lo que hace este tipo de técnica compleja en cuanto a su implementación pero altamente eficiente para compensar elevados valores de CD [37]. Adicionalmente, su implementación con diferentes formatos de modulación es viable [90], ya que su dependencia se basa principalmente en el bloque que contiene el filtro transversal, no obstante, su diseño está sujeto al tipo de modulación que se esté aplicando [37,44]. En la figura 1.26, se presenta el esquema de un ecualizador FFE en el lugar del transmisor.

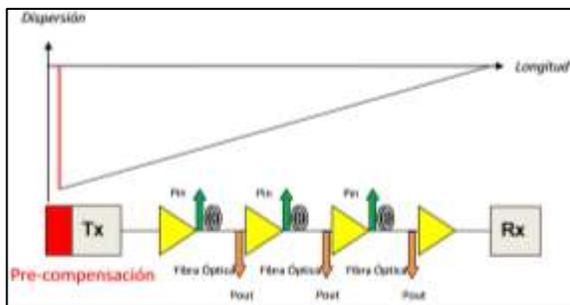


Figura 1.25. Pre-compensación electrónica para la CD [6].

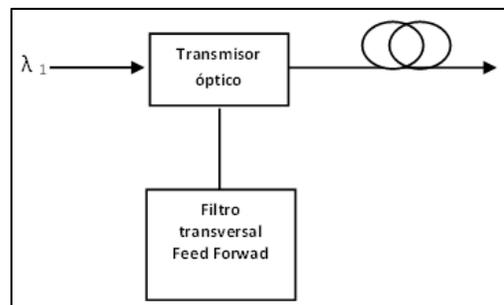


Figura 1.26. Filtro transversal Feed Forward en el lugar del transmisor [37].

<sup>22</sup> La pre-distorsión de las señales ópticas se lleva a cabo mediante la modificación de las señales en el dominio electrónico.

En el desarrollo del trabajo de grado, se implementa la técnica de post-compensación electrónica para la CD, mediante un FFE con posible combinación de procesos ZF o MMSE, que permitan realizar correcciones que logren ciertos objetivos de desempeño. El desarrollo matemático del proceso ZF y MMSE se muestra en los anexos C y D, respectivamente.

#### 1.4 MODELO SIMPLIFICADO DE RED

A continuación se procede a encontrar un modelo simplificado de red que reúna las diferentes características concernientes a operadores comerciales WDM: 32 y 58, y distintos estudios del comportamiento de las técnicas de compensación para CD en redes WDM: 2, 5-8, 10, 12, 17, 28, 35, 36 y 55, para posteriormente ser plasmado en un escenario de simulación que permita evaluar el comportamiento de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM. La caracterización del modelo simplificado se fundamenta en:

1. Enlace punto a punto, las características se especifican en la sección 1.1.
2. El esquema modular de red WDM, especificado en la sección 1.1 y sus respectivos anexo.
3. La tecnología DWDM unidireccional, conforme a la sección 1.1.
4. Se eligen una variación de 2 y 4 canales, para observar la influencia del número de canales en el desempeño de diferentes técnicas de compensación para la CD.
5. La Fibra óptica SSMF o estándar G.652, tipo de fibra óptica con mayor implementación en redes WDM comerciales a 10 Gbps, ligado a las características mostradas en la sección 1.1.1.
6. Banda C, alrededor de los 1550 nm, banda de operación en la que la fibra G.652 presenta la atenuación mínima, su explicación a mayor detalle se presenta en la sección 1.1.1.
7. Los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK, caracterizados por presentar una mayor implementación a nivel comercial en redes WDM a 10 Gbps, respecto a las características mostradas en la sección 1.1.2.
8. Velocidad de transmisión 10 Gbps, respectiva a la compensación de dispersión de segundo orden, sección 1.1.4.

A continuación se procede a calcular los parámetros más relevantes del modelo simplificado de red de la siguiente manera:

1. Se consideran un rango potencias desde 0 a 6 dBm, conforme a las secciones Le-64.2 y Ls-64.2 de la ITU-T G.691 correspondientes a redes WDM a 10 Gbps alrededor de los 1550 nm [109]. El rango de potencias mencionado va acorde con las características ofrecidas por la interfaz óptica STM-64 para 10 Gbps en la descripción técnica del equipo OSN3500 de Huawei [76]. Paralelamente, se escoge la modulación externa para evitar efectos del chirp del transmisor óptico.
2. Teniendo en cuenta una tasa de transmisión (R - Rate) a 10Gbps y un espectro de potencia aproximadamente de 10 GHz (0,16 nm), el tiempo de duración de bit ( $T_d$ ) viene dado por [68,108]:

$$T_d = \frac{1}{R} = \frac{1}{10 \text{ Gbps}} = 100 \text{ ps} \quad (1.26)$$

3. La CD máxima permisible, sin necesidad de aplicar técnicas de compensación, ecuación (1.7), para una señal a 10 Gbps es:

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{4 * 10Gbps} = 25 ps$$

4. Los órdenes de CD del pulso se basan en distancias de fibra óptica en un rango entre 60 km y 500 km; correspondientes a los amplios reportes de redes WDM reales y experimentales a nivel comercial con técnicas de compensación para la CD [2, 3, 5, 12, 13, 36, 50 y 52]:

$$60 km \leq Distancia (L) \leq 500 km$$

5. Para el rango de distancia definido en el numeral cuatro (4), se tienen los siguientes límites de ensanchamiento del pulso [108]:

- En función de la longitud  $L$ , la constante de dispersión de la fibra óptica ( $D(\lambda)$ ) y el ancho espectral de la fuente óptica ( $\Delta(\lambda)$ ), ecuación (1.8):

$$163 ps \leq \text{Ensanchamiento del pulso } (\Delta t) \leq 1360 ps$$

- En función de la constante de dispersión de la fibra óptica ( $D(\lambda)$ ) y la longitud  $L$ , ecuación (1.9):

$$1020 \frac{ps}{nm} \leq \text{Ensanchamiento del pulso } (\Delta t) \leq 8500 \frac{ps}{nm}$$

6. Los EDFAs, implementados para el desarrollo del trabajo de grado, se basan en las características de los amplificadores Corning Pure Gain 1500 Compact de ganancia constante, utilizado en redes WDM comerciales [34], tabla 1.6.

Tipo de amplificador	Ganancia constante	Potencia máxima de salida	Figura de Ruido
Corning Pure Gain 1500 Compact de ganancia constante	23 dB	21 dB	5.2 dB

Tabla 1.6. Amplificador Corning pure gain 1500 compact de ganancia constante.

7. Basado en los parámetros del amplificador de ganancia constante Corning Pure Gain 1500 Compact, tabla 1.6, parámetros de la fibra G.652, tabla 1.2 y parámetros de la DCF, tablas 1.4 y 1.5, se puede encontrar la máxima distancia del tramo de fibra óptica que puede ser amplificada en función de la ganancia del EDFA, tabla 1.7, basado en la ecuación (1.1):

Longitud de G.652 (km)	Requieren amplificación de G (dB)
120	30
70	17.5
40	10

Tabla 1.7. Máxima distancia del tramo de fibra óptica que puede ser amplificada en función de la ganancia.

Dentro de un rango apropiado de ganancia para los valores comerciales, la ubicación de amplificadores está entre los 40 y 120 km, sujeto a cambios debido a los formatos de modulación.

Con el fin de mitigar la dispersión acumulada a través de técnicas de compensación ópticas para la CD, teniendo en cuenta la distancia máxima expuesta en el numeral cuatro de esta sección, la constante de dispersión de la G.652, tabla 1.2, la constante de dispersión de la DCF, tabla 1.4 y mediante la ecuación (1.10), se determina la longitud de la fibra DCF de la siguiente manera:

$$17 \frac{ps}{nm * km} \times 500km - 80 \frac{ps}{nm * km} \times L_{DCF} = 0$$

$$L_{DCF} = 106.25 km$$

Sin embargo, si se considera que los EDFA pueden ser colocados aproximadamente cada 70km, entonces se toma una longitud de Fibra óptica Principal de  $L_{FOP} = 70km$ , por lo tanto:

$$L_{DCF} = 12.75 km$$

Por consiguiente, los EDFA y la DCF deben ubicarse a  $L_{FOP} + L_{DCF}$ , correspondiente a 84,87 km, sujeto a cambios, debidos a la técnica de compensación óptica para la CD que se implemente.

8. El espaciamiento entre retardos tap para una señal a 10 Gbps, ecuación (1.22), con una duración del bit igual a  $T = 100 ps$  (numeral uno (1) de esta sección) viene dado por [37,51]:

$$\text{Espaciamiento entre taps} = \frac{100 ps}{2} = 50 ps$$

El número de taps (m) de un FFE y DFE, ecuación (1.32), conociendo la dispersión acumulada en ps para 200 km de SSMF-28, que propaga una señal a 10Gbps y ancho espectral de 0,16 nm, se tiene:

$$m = \frac{544ps}{50ps} = 11 \text{ tap con aproximacion al entero mayor}$$

Lo que en otras palabras se representa como el número de taps espaciados T/2 aproximadamente necesarios para mitigar 560 ps de dispersión o lo que es igual 3400 ps/nm para un tramo de fibra óptica SSMF de 200 km que transporta una señal a 10Gbps.

El diseño del número de taps está sujeto al formato de modulación y la técnica de compensación electrónica aplicada, por lo tanto, para el modelo simplificado de red se elige un rango de 5 a 20 taps para el FFE, y 2 a 8 taps para el DFE, conforme a distintos estudios del comportamiento de las técnicas de compensación electrónicas para CD en redes WDM [6,52,93,97].

9. Basado en el equipo MHL3000 de Ericsson, se define una sensibilidad en el receptor de -32 dBm [11].

10. Definición de los canales del modelo simplificado de red fundamentado en el estándar ITU-T G.694.1, para definir las longitudes de onda para los diferentes espaciamientos del canal [14]:

- Espaciamientos de 12.5GHz: (1.27)  
193.1+n x 0.0125

- Espaciamientos de 25GHz: (1.28)  
193.1+n x 0.025

- Espaciamientos de 50GHz: (1.29)  
193.1+n x 0.05

- Espaciamientos de 100GHz: (1.30)  
193.1+n x 0.1

Donde n es cualquier entero positivo o negativo y 193.1 es la frecuencia de referencia en THz. Con la ecuación (1.31), se determina la longitud de onda ( $\lambda$ ) a partir de la frecuencia específica ( $f$  [THz]).

$$\lambda[nm] = \frac{2.99792458 * 10^8 \left[ \frac{m}{sg} \right]}{f[THz]} \quad (1.31)$$

Para el modelo simplificado de red, se utiliza el plan de frecuencias definido para un equipo ONS 15454 de CISCO, tabla 1.8, implementado por algunos operadores a nivel nacional.

Ch 1 – 1534.12nm	Ch 9 – 1540.52nm	Ch 17 – 1546.92nm	Ch 25 – 1553.32nm
Ch 2 – 1534.92nm	Ch 10 – 1541.32nm	<b>Ch 18 – 1547.72nm</b>	Ch 26 – 1554.12nm
Ch 3 – 1535.72nm	Ch 11 – 1542.12nm	<b>Ch 19 – 1548.52nm</b>	Ch 27 – 1554.92nm
Ch 4 – 1536.52nm	Ch 12 – 1542.92nm	<b>Ch 20 – 1549.32nm</b>	Ch 28 – 1555.72nm
Ch 5 – 1537.32nm	Ch 13 – 1543.72nm	<b>Ch 21 – 1550.12nm</b>	Ch 29 – 1556.52nm
Ch 6 – 1538.12nm	Ch 14 – 1544.52nm	Ch 22 – 1550.92nm	Ch 30 – 1557.32nm
Ch 7 – 1538.92nm	Ch 15 – 1545.32nm	Ch 23 – 1551.72nm	Ch 31 – 1558.12nm
Ch 8 – 1539.72nm	Ch 16 – 1546.12nm	Ch 24 – 1552.52nm	Ch 32 – 1558.92nm

Tabla 1.8. Plan de Frecuencias para 32 canales a 100 GHz [24,32]. Los canales 18, 19, 20 y 21, son los canales a implementar en el desarrollo del trabajo de grado.

Después de realizar la especificación de las características, cálculo de los parámetros, definición del número de canales, análisis detallado de las redes ópticas comerciales a nivel nacional e internacional [3-5,8,12,21,30,35,37,42,50,52], los estándares de la ITU-T concernientes a redes WDM y estudios concernientes a las técnicas de compensación para la CD [14,16,20,22,32,38,77]; se procede a realizar un resumen de las características, parámetros más relevantes y principales valores, tabla 1.9, de los elementos que conforman el modelo simplificado de red, fig. 1.27, definido por la sección del transmisor, medio de transmisión (incluye amplificadores ópticos) y receptor. Para el trabajo de grado, el modelo simplificado de red representa una red WDM con técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD, regido bajo los elementos y características definidas en el documento hasta este punto.

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>			
<b>PARÁMETRO</b>		<b>VALORES</b>	
Velocidad del Sistema		10 Gbps	
Tecnología de Red		DWDM unidireccional	
Banda		Banda C ( 1530-1560 nm)	
Ventana		alrededor de 1550 nm	
Estándar Utilizado		G.652.B	
Tipo de fibra		SSMF-28	
Espaciamiento de los canales DWDM		100 GHz (0.8 nm)	
Número de canales		1 y 4 canales	
Coeficiente de atenuación para 1550nm		0.25 dB/Km	
Coeficiente de Dispersión 1550nm		17 ps/nm.km	
<b>CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR</b>			
Formato de modulación		NRZ-OOK y NRZ-DPSK	
Tipo de modulación		Externa con Mach-Zenhder	
Tipo de laser		CW	
Potencia de Tx del Láser		0 a 6 dBm	
Frecuencias Centrales Nominales		Seleccionadas según la tabla 1.5	
<b>CARACTERÍSTICAS DE AMPLIFICACIÓN</b>			
Dispositivo de Amplificación		EDFA	
Espaciamiento entre Amplificadores		50 - 120 Km sujeto a variaciones de la ganancia del amplificador, el formato de modulación y la técnica de compensación aplicada.	
Ganancia		15 - 30 dB	
Figura de Ruido		3 - 7 dB	
<b>TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN PARA LA CD</b>			
<b>TÉCNICA</b>	<b>DISPOSITIVO QUE INTERVIENE</b>	<b>VALOR</b>	
<b>ÓPTICA</b>	DCF	<b>Coeficiente de atenuación</b>	<b>Coeficiente de Dispersión</b>
		0.5 dB/km	-80 ps/nm.km
<b>ELECTRÓNICA</b>		<b>No de taps</b>	<b>Espaciamiento</b>
	FFE	5 - 20	50 ps
	DFE	2 - 8	50 ps
<b>CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR <sup>23</sup></b>			
Sensibilidad del Rx		-32 dBm	
BER		10 <sup>-9</sup>	
Filtros de recepción ópticos		Filtro Bessel de orden 4 de 10 GHz	

Tabla 1.9. Características y parámetros más relevantes del modelo simplificado de red [32].

<sup>23</sup> Las características del receptor especificado se basan en el equipo OSN3500 de Huawei [76].

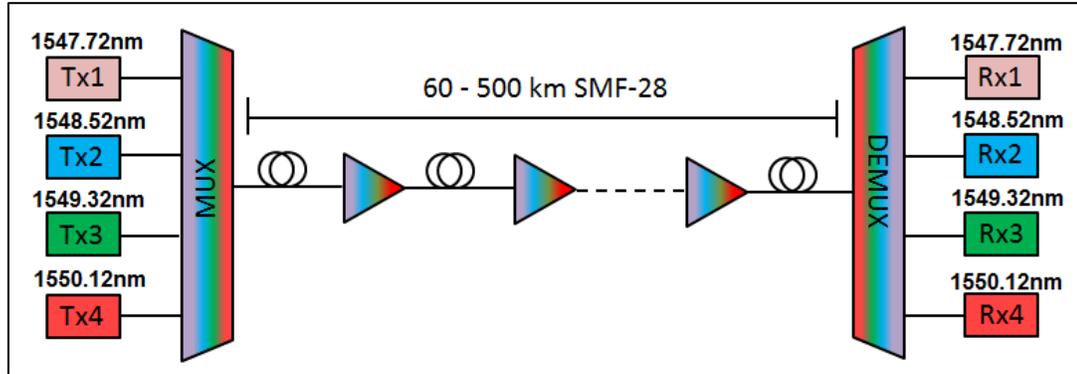


Figura 1.27. Modelo simplificado de red [32].

Mediante el desarrollo del presente capítulo, se realizó un análisis detallado del comportamiento de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM y junto con la información brindada por los estándares de la ITU-T, se definió un modelo simplificado de red que se aproxime a los sistemas WDM implementados comercialmente, determinando sus principales características, que técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD se van a analizar y los rangos de operación fundamentales. Posteriormente en el siguiente capítulo se definirá una metodología de simulación que se fundamenta en el modelo simplificado de red para generar un escenario de simulación.

## 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En el presente capítulo, se define una metodología de simulación, que requiere del desarrollo de una serie de etapas para plasmar el modelo simplificado de red (numeral 1.5) en un escenario de simulación, el cual mediante la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, permita evaluar el desempeño de las diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD, definidas en los numerales 1.3 y 1.4, teniendo en cuenta los parámetros de monitoreo más relevantes en redes WDM mostrados en el anexo H. La serie de etapas de la metodología simulación elegida, se fundamentan en los documentos “introducción a los simuladores” [47] del manual de OPNET, “ingeniería del software, un enfoque práctico” [48] y “simulador digital [67]; estas etapas son:

- Formulación del problema.
- Especificación de las características y elección del modo de operación de la herramienta de simulación.
- Generación y definición de las características del escenario de simulación.
- Plan de evaluación y pruebas.

A continuación se procede a explicar detalladamente cada una de estas etapas:

### 2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El objetivo a nivel de simulación es analizar el desempeño de diferentes técnicas de compensación óptica y electrónicas para la CD en redes WDM, para lo cual fue necesaria una investigación previa, realizada de la siguiente manera:

- Selección de los formatos de modulación (numeral 1.2.2), mediante el análisis del estado del arte dentro del contexto comercial nacional e internacional de los formatos de modulación.
- Análisis de la influencia de la CD (numeral 1.2.4) en el desempeño de las redes WDM, donde se caracterizó el comportamiento de los pulsos, el orden de dispersión a compensar y la velocidad de transmisión.
- Análisis del comportamiento de las técnicas de compensación ópticas (numeral 1.3) y electrónica (numeral 1.4) para la CD, donde se analizan los diferentes factores que determinan el desempeño de cada técnica, además de seleccionar las técnicas de compensación para la CD a implementar y evaluar.
- Definición de los parámetros de monitoreo óptico (anexo H), en el cual se definen los parámetros que serán utilizados como medida para determinar el desempeño de las técnicas de compensación óptica y electrónicas para la CD en redes WDM.

### 2.2 ESPECIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y ELECCIÓN DEL MODO DE OPERACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

El desarrollo del trabajo de grado utiliza como herramienta de simulación a OptSim® de Rsoft<sup>24</sup>, el cual es un entorno que soporta el diseño y la evaluación de desempeño del nivel de transmisión de sistemas de comunicaciones ópticas. Las

---

<sup>24</sup> [www.rsoftdesign.com](http://www.rsoftdesign.com)

facilidades de visualización y post-procesamiento de datos proporcionan una interface gráfica de medición flexible que actúa como un conjunto de instrumentos virtuales de laboratorio. OptSim® puede ser utilizado para un amplio rango de aplicaciones, entre las cuales se pueden destacar:

- Optimización de los enlaces.
- Análisis de las pérdidas, efectos lineales y no lineales.
- Investigación de nuevos esquemas de modulación.

En la figura 2.1, se observan las técnicas de simulación con las cuales cuenta la herramienta de simulación OptSim de Rsoft, clasificadas en el dominio del espectro y el dominio de la frecuencia. A continuación, se especifican las características de cada una de ellas.



Figura 2.1. Técnicas de simulación de la Herramienta OptSim® [57].

- **Técnica de Propagación Espectral (SPT):** es una simulación en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia, cada componente es caracterizada por una función de transferencia que no toma en cuenta las no linealidades de la fibra. Sin embargo, esta técnica es utilizada por VBS para estimar los puntos operativos tales como EDFAs, donde se requiere un conocimiento previo del espectro de potencia promedio de entrada [57].
- **Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS):** es una simulación en el dominio del tiempo, la cual es el centro del entorno de simulación OptSim, 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 [57].

La herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, en su documento “User Guide” [57], define dos modos de simulación, que se clasifican dependiendo del tipo de resultados que se deseen obtener y de los elementos de simulación que proporcione para crear o manipular las señales. Estos modos de simulación son:

- **Modo bloque:** la señal de los datos pasan entre componentes representando todo el tiempo de simulación en un bloque de datos. La ventaja de este modo de simulación es que los modelos de los componentes y algoritmos pueden trabajar con toda la señal, transformándola en el dominio del tiempo y de la frecuencia para operar datos en el ambiente más conveniente para el algoritmo de simulación [57]. Este modo simula la fibra óptica utilizando el Paso Dividido de Fourier (SSF – Split Step Fourier) comúnmente utilizado por equipos de comunicaciones ópticas de gamas

LinkSIM™, iFROST™, y FOLDtools™ que simulan distintos tipos de enlaces [57].

- **Modo muestra:** la señal de los datos pasa entre componentes representando una muestra única o un paso de tiempo a la vez. Una de las ventajas de este modo es que la simulación se pueden realizar a través de una cantidad de tiempo ilimitado que cubre una longitud ilimitada de secuencias de transmisión. El procesamiento de las señales se realiza completamente en el dominio del tiempo [57]. Este modo simula la fibra óptica utilizando el Paso Dividido en el Dominio del Tiempo (TDSS – Time Domain Split Step).

El modo bloque y el modo muestra permite la implementación de las técnicas de compensación ópticas para la CD en escenario de simulación; sin embargo, el modo bloque a diferencia del modo muestra, tiene modelos de los componentes de ecualizadores DFE y FFE con la posibilidad de que cada uno de ellos utilice la combinación del proceso MMSE. Los ecualizadores son los elegidos en el trabajo de grado para implementar las técnicas de compensación electrónicas para la CD, por esta razón, el escenario de simulación se implementa en modo bloque.

### 2.3 GENERACIÓN Y DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En la presente sección se plasma el modelo simplificado de red en un escenario de simulación, que permita evaluar mediante la herramienta de simulación OPTSim®, el desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD; por tal motivo, la generación y definición de las características del escenario de simulación tiene como punto de partida las características más relevantes concernientes a operadores comerciales WDM y distintos estudios del comportamiento de las técnicas de compensación para la CD. Estas características están resumidas y detalladas en el modelo simplificado de red (sección 1.5).

La generación y definición del escenario de simulación está constituido y condensado en la figura 2.2, donde se visualizan las diferentes configuraciones que representan las técnicas de compensación ópticas y electrónicas detalladas en el capítulo 1. Por esta razón y para un mejor entendimiento de esta sección, se destaca de la especificación de las técnicas ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM, que las técnicas de compensación ópticas para la CD (sección 1.3), están enmarcadas dentro de la temática conocida como la ODM y son aplicadas en el canal de transmisión, ya sea antes (pre-compensación) o después (post-compensación) de la fibra óptica principal. Por su parte, las técnicas de compensación electrónicas para la CD (sección 1.4), están enmarcadas dentro de la temática conocida como la EDC y se aplican en el lugar del transmisor (pre-compensación) o en el lugar del receptor (post-compensación), para cada uno de los canales a multiplexar y de-multiplexar.

El desarrollo del trabajo de grado se fundamenta en las técnicas de compensación ópticas para la CD, con DCM que involucran DCF; mientras que, las técnicas de compensación electrónicas para la CD, se fundamentan en PDS con ecualizadores que involucran procesos DFE y FFE con la combinación del proceso MMSE.

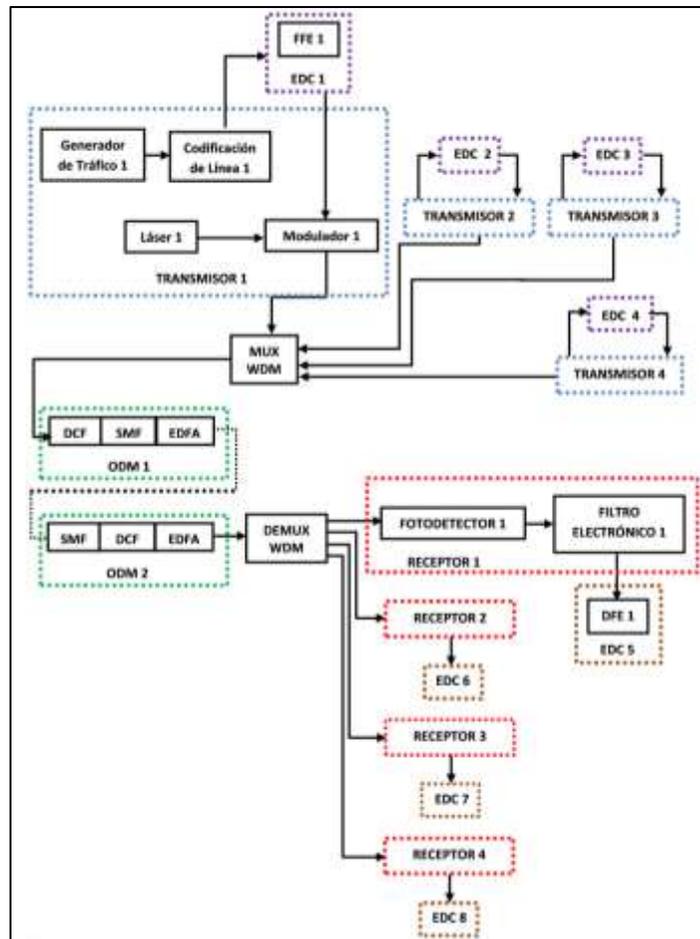


Figura 2.2. Esquema del escenario de simulación. Leyenda: ODM1: Referente a la técnica de pre-compensación óptica. ODM2: Referente a la técnica de post-compensación óptica. EDC1, EDC2, EDC3, EDC4: Referentes a la técnica de pre compensación electrónica. EDC5, EDC6, EDC7, EDC8: Referentes a la técnica de post-compensación electrónica.

Con el fin de evaluar el desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD bajo los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK, se presentan cinco (5) configuraciones basadas en el esquema del escenario de simulación, fig. 2.2, distribuidas de la siguiente manera:

- **Configuración 1:** escenario de simulación con ausencia de técnicas de compensación, no aplica ODM ni EDC.
- **Configuración 2:** Escenario de simulación con técnica de pre-compensación óptica para la CD, aplica ODM1.
- **Configuración 3:** escenario de simulación con técnica de post-compensación óptica para la CD, aplica ODM2.
- **Configuración 4:** escenario de simulación con técnica de pre-compensación electrónica para la CD, aplican EDC1, EDC2, EDC3 y EDC4.
- **Configuración 5:** escenario de simulación con técnica de post-compensación electrónica para la CD, aplican EDC5, EDC6, EDC7 y EDC8.

## 2.4 PLAN DE EVALUACIÓN Y PRUEBAS

A continuación, se detalla el plan de evaluación y pruebas a seguir para determinar, mediante la herramienta de simulación Optsim, el desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD bajo formatos de modulación más utilizados en implementaciones comerciales en redes WDM:

1. Se analiza el comportamiento del escenario de simulación, con ausencia de las técnicas de compensación, con el fin de determinar la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación con los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. El análisis se lleva a cabo teniendo en cuenta los parámetros de monitoreo que determinan el desempeño de redes WDM.
2. Se analiza el comportamiento del escenario de simulación con las configuraciones 1 y 2 concernientes a las técnicas de compensación ópticas para la CD, bajo la influencia de variaciones de potencia de transmisión, longitud de la SMF-28 (conlleva obligatoriamente a variaciones de la DCF), espaciamiento entre amplificadores (dependen de la longitud de la SMF-28 y DCF) y número de canales en formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. El análisis se lleva a cabo teniendo en cuenta los parámetros de monitoreo que determinan el desempeño de redes WDM.
3. Se analiza el comportamiento del escenario de simulación con las configuraciones 3 y 4 concernientes a las técnicas de compensación electrónicas para la CD, bajo la influencia de variaciones de potencia, longitud de SMF-28 y número de taps (cada tap presenta su respectivo coeficiente tap); en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. El análisis se lleva a cabo teniendo en cuenta los parámetros de monitoreo que determinan el desempeño de redes WDM.

El plan de evaluación y pruebas explicado anteriormente se fundamenta en el diagrama de la figura 2.3, en donde se explica el flujo de la simulación por seguir para cada una de las configuraciones de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD.

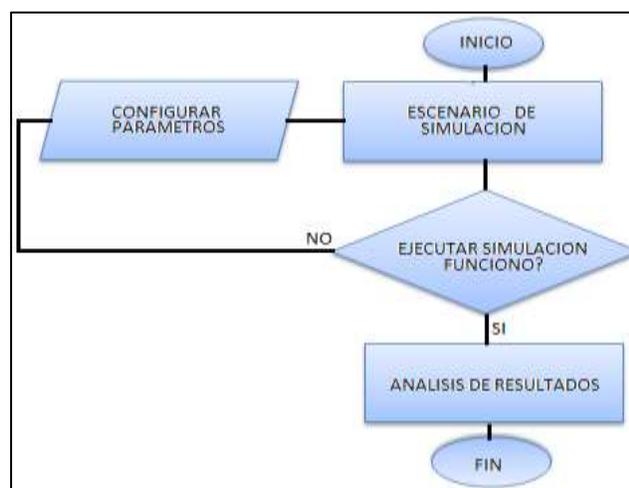


Figura 2.3. Diagrama de flujo para el escenario de simulación [32].

El análisis de resultados de los numerales 1, 2 y 3, de esta sección se determina teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño de operadores WDM comerciales mostrados a continuación [23,30,32,33]:

- Estimación de BER:  $\leq 10^{-9}$  (teórico), real alrededor de  $10^{-15}$ .
- Factor Q: 15 dB (teórico), real alrededor de 25 dB.
- Sensibilidad del receptor mínimo de -32 dBm.

Los parámetros de la BER, factor Q y sensibilidad del receptor reales, hacen referencia a los valores que manejan los operadores WDM comerciales a 10 Gbps.

El desarrollo del presente capítulo, determinó una metodología de simulación en la cual se requirió y desarrolló una serie de etapas, que permitieron plasmar el modelo simplificado de red en un escenario de simulación. Al mismo tiempo, se diseñó un plan de evaluación y pruebas, mediante una serie de pasos, que se mencionan en el inicio de esta sección y se desarrollan en el siguiente capítulo con el fin de evaluar, mediante la herramienta de simulación OPTSim®, el desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD.

### 3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS PARA LA CD EN REDES WDM

Las actividades por desarrollar se enfocan en la evaluación del desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD bajo formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. Este objetivo es abordado mediante los numerales definidos en el plan de evaluación y pruebas de la sección 2.4, implementando en OptSim el escenario de simulación, sección 2.3, para posteriormente realizar un estudio del comportamiento de las cinco (5) configuraciones de la figura 2.2, tomando una serie de parámetros fijos y variables en el transmisor, canal óptico, receptor, ODM y EDC, representativos de cada técnica de compensación para la CD implementada en una red WDM. Dado que nuestro objetivo es analizar el efecto de la CD, se ignoran efectos no lineales y de PMD. La figura 3.1, muestra la implementación del escenario de simulación, fig. 2.2, en la herramienta OptSim de Rsoft en modo bloque, conforme a la sección 2.2.

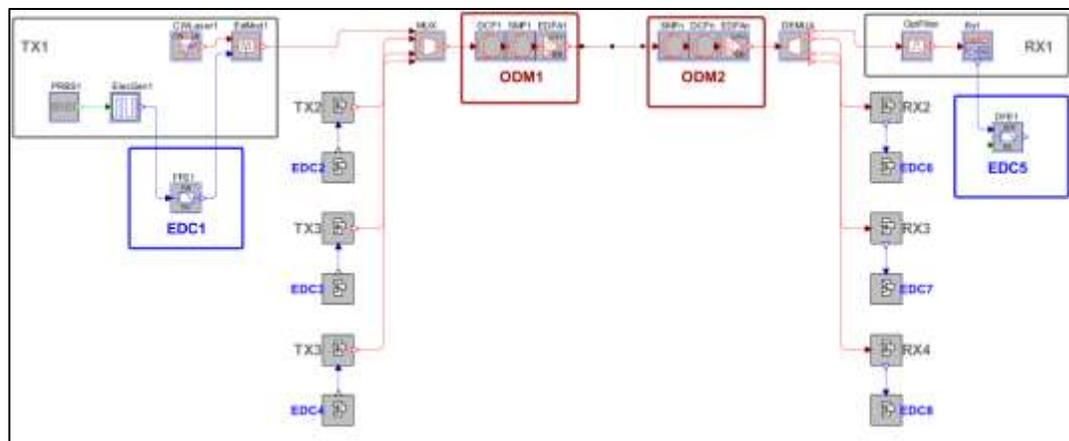


Figura 3.1. Escenario de simulación implementado en OptSim. Leyenda: ODM1: Referente a la técnica de pre-compensación óptica. ODM2: Referente a la técnica de post-compensación óptica. EDC1, EDC2, EDC3, EDC4: Referentes a la técnica de pre compensación electrónica. EDC5, EDC6, EDC7, EDC8: Referentes a la técnica de post-compensación electrónica.

#### 3.1 ESCENARIO DE SIMULACIÓN EN AUSENCIA DE TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN PARA LA CD - CONFIGURACIÓN 1

La figura 3.2 muestra la configuración 1 del escenario de simulación en ausencia de las técnicas de compensación para la CD, en donde no aplica ODM ni EDC (técnica de compensación óptica y electrónica para la CD, respectivamente). El desarrollo de esta sección se aborda mediante el numeral 1 del plan de evaluación y pruebas, sección 2.4, concerniente a analizar el comportamiento del escenario de simulación en ausencia de las técnicas de compensación para la CD, con el fin de determinar la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación con los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. El análisis se lleva a cabo teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño de operadores WDM comerciales definidos en la sección 2.4.

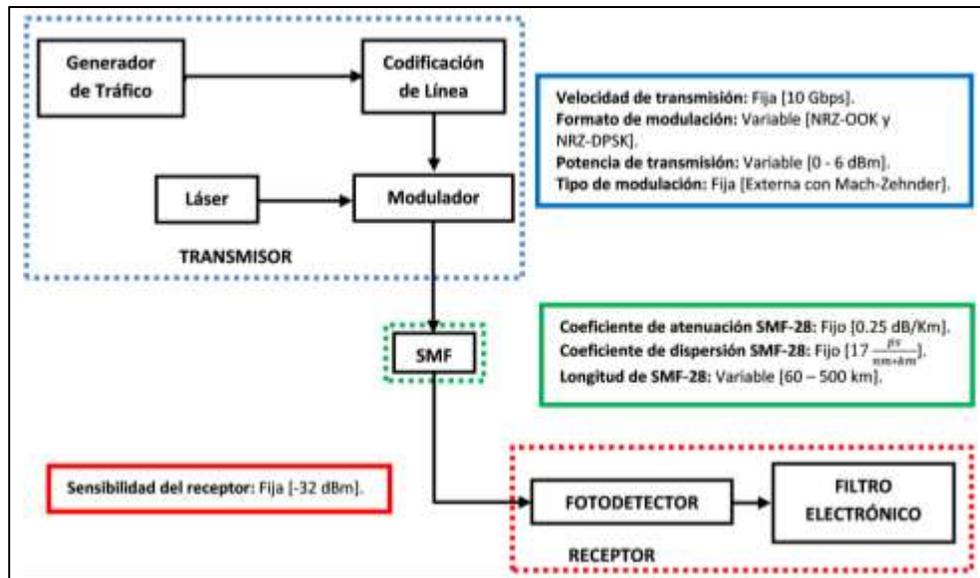


Figura 3.2. Escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación para la CD.

El análisis del comportamiento del escenario de simulación en ausencia de técnicas de compensación para la CD con los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK, se especifica en las secciones:

**3.1.1** Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK.

**3.1.2** Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.

Con el objetivo de analizar el desempeño de las diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM, se define y evalúa la máxima distancia de SMF-28 alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación para una BER de  $10^{-9}$  con los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK.

En primer lugar se define un enlace monocanal (ch 18) de acuerdo a la tabla 1.8. En segundo lugar se define una variación de SMF-28 en un rango de 60 a 100 km, acorde a cálculos de la tolerancia de la CD reportados en 37, 55, 78, para diferentes escenarios de simulación de redes WDM. De forma dual, se realizan variaciones de la potencia de transmisión en un rango de 0 a 6 dBm, equivalente a un margen aproximado de 1 a 4 mw<sup>25</sup>. Los rangos de longitud de SMF-28 y de potencia transmisión, presentan incrementos de 5 km y 1 mw, respectivamente.

### **3.1.1 Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK.**

La figura 3.3 muestra el escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK implementado en OptSim.

<sup>25</sup> Se define el rango en mw debido a que el vatio es la unidad de entrada permisible por el láser CW en la herramienta de simulación OptSim.

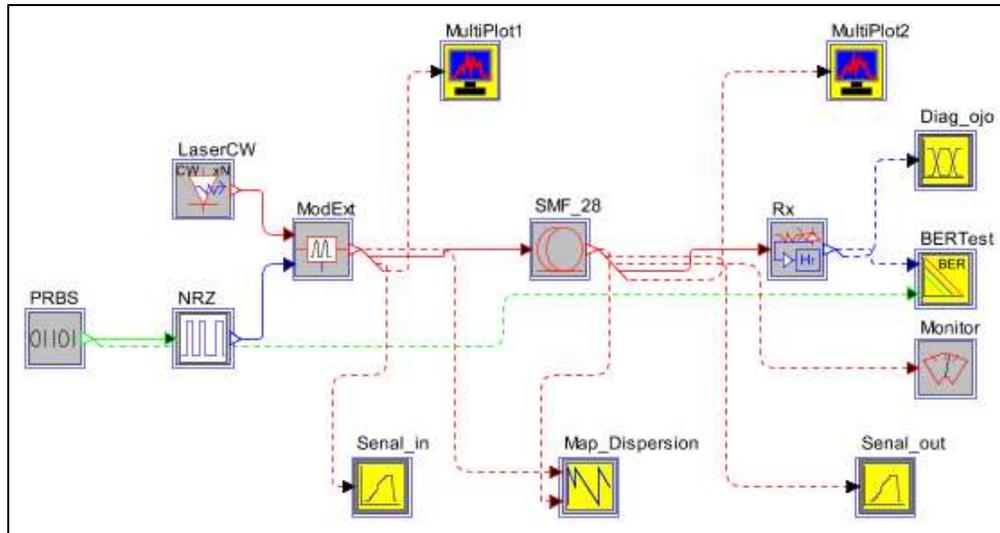


Figura 3.3. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

La figura 3.4, muestra los diagramas de ojo back to back, y de longitudes de SMF-28 de 60 km y 100 km a una potencia mínima de 1 mw. El diagrama de ojo back to back, se genera con el fin de mostrar un diagrama de ojo ideal (sin degradaciones inducidas por la CD y atenuación).

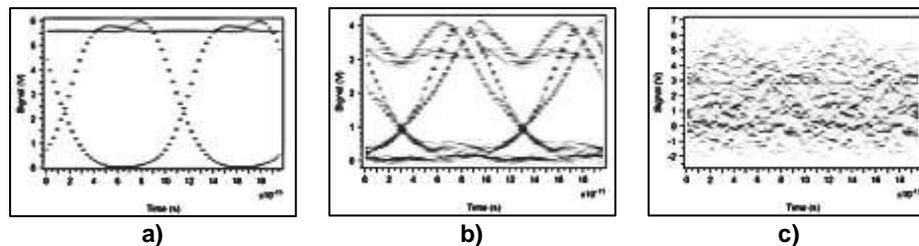


Figura 3.4. Diagramas del ojo del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK para una longitud de SMF-28 para, a) back to back, b) 60 km, c) 100 km.

Los diagramas del ojo de la figura 3.4 reflejan una disminución en la apertura del ojo, un ensanchamiento en el tiempo, un aumento en la BER y jitter, al aumentar la longitud de la SMF-28. Este análisis corrobora el deterioro de la señal en recepción, originado por el efecto de la CD y atenuación, a medida que la longitud del enlace aumenta.

La tabla 1 del anexo I y las figuras 3.5, 3.6 y 3.7, muestran las medidas de BER estimada, factor Q estimado y apertura del ojo del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK, al realizar incrementos de:

- 5 km de longitud de SMF-28 en un rango de 60 a 100 km.
- 1 mw de potencia de transmisión en un rango de 1 a 4 mw.

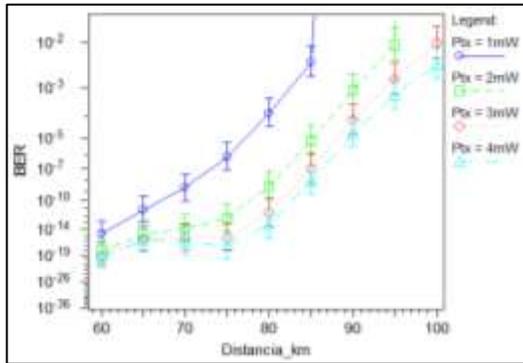


Figura 3.5. BER estimada vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.

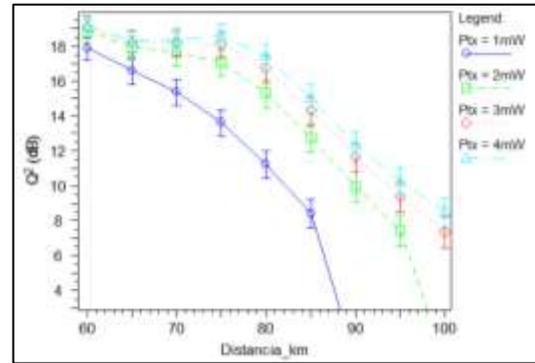


Figura 3.6. Factor Q estimado vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.

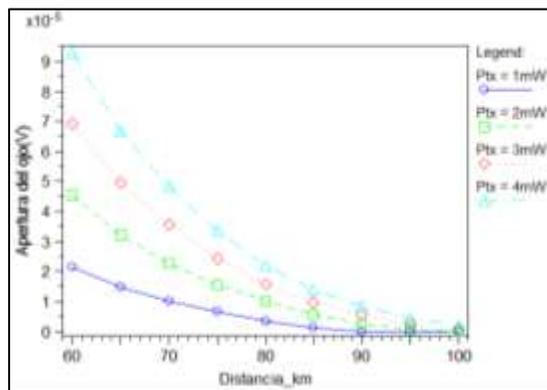


Figura 3.7. Apertura del ojo vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.

De la tablas 1, 2 del anexo I y las figuras 3.5, 3.6, 3.7, se puede apreciar como el efecto de la CD y la atenuación, compromete y limita el desempeño del sistema, a medida que la longitud de la SMF-28 aumenta. Esta limitación es menor cuando la potencia se transmisión aumenta, sin embargo, este incremento no puede ser indiscriminado, debido a su alta dependencia con los efectos no lineales.

La tabla 3.1 resume la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación, con el formato NRZ-OOK para potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw, además de las medidas de BER estimada y factor Q estimado, bajo parámetros mínimos de desempeño de operadores WDM comerciales definidos en la sección 2.4.

Potencia de transmisión (mw)	Longitud de SMF-28 (km)	Medida de Dispersión (ps/nm)	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Potencia recibida (dBm)
1	70	1179	2.0776e-009	15.384	-20.71
2	80	1347	2.8467e-009	15.307	-20.20
3	83	1398	9.9436e-009	14.321	-18.44
4	85	1431	9.0992e-009	15.008	-18.44

Tabla 3.1. Medidas de distancia, dispersión, BER estimada, factor Q, potencia en recepción, del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK para una potencia de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw.

Finalmente, se concluye en esta sección que la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación, con del formato de modulación NRZ-OOK para el escenario de simulación bajo criterios de una BER estimada de  $10^{-9}$  y un factor Q de 15 dB es de:

- 70 km con una dispersión acumulada de 1179 ps/nm, para una potencia mínima de 1 mw.
- 85 km con una dispersión acumulada de 1431 ps/nm, para una potencia máxima de 4 mw.

### 3.1.2 Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.

La figura 3.8 muestra el escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK implementada en OptSim.

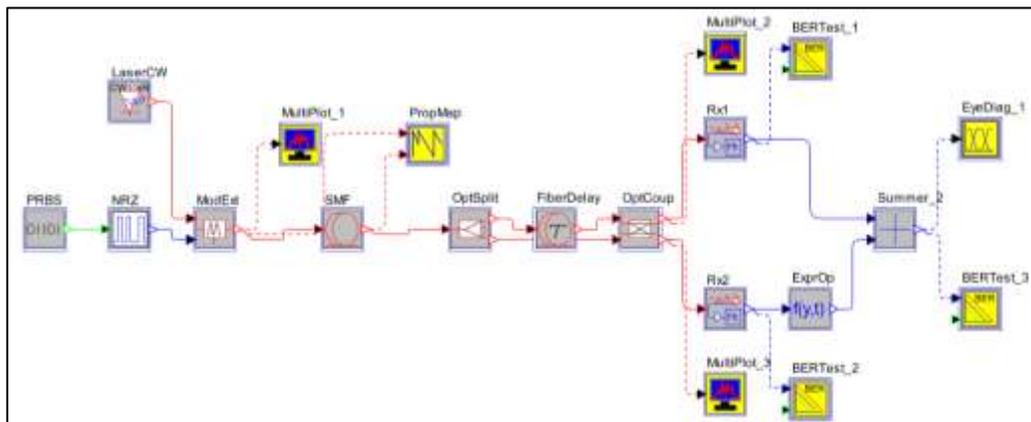


Figura 3.8. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim. Leyenda: El anexo B muestra la constitución y los elementos que intervienen en el formato de modulación NRZ-DPSK.

La figura 3.9, muestra los diagramas de ojo back to back, y longitudes de SMF-28 de 60 km y 100 km a una potencia mínima de 1 mw. El diagrama de ojo back to back, se genera con el fin de mostrar un diagrama de ojo ideal (sin degradaciones inducidas por la CD y atenuación).

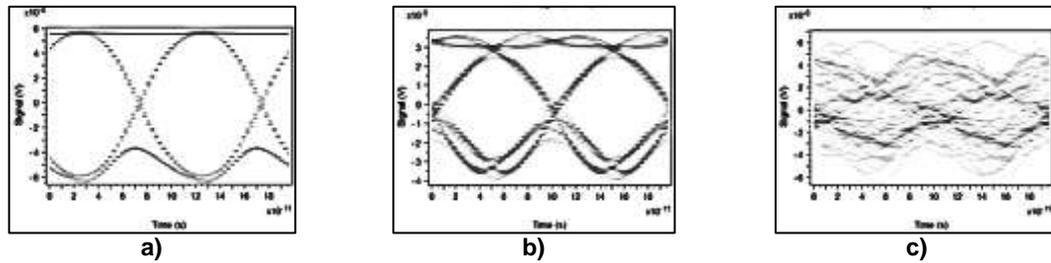


Figura 3.9. Diagramas del ojo del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK con una longitud de SMF-28 para, a) back to back, b) 60 km, c) 100 km.

Los diagramas del ojo de la figura 3.9 reflejan una disminución en la apertura del ojo, un ensanchamiento en el tiempo, un aumento en la BER y jitter, al aumentar la longitud de la SMF-28. Este análisis cualitativo corrobora el deterioro de la señal en recepción, originado por el efecto de la CD, a medida que la longitud del enlace aumenta.

La tabla 1 del anexo I y las figuras 3.10, 3.11, 3.12, muestran las medidas de BER estimada, factor Q estimado y apertura del ojo del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK, al realizar variaciones de:

- 5 km de longitud de SMF-28 en un rango de 60 a 100 km.
- 1 mw de potencia de transmisión en un rango de 1 a 4 mw.

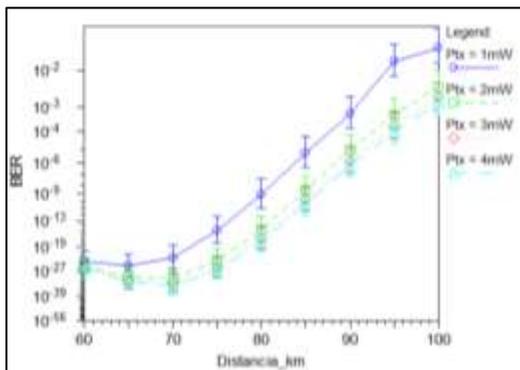


Figura 3.10. BER estimada vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.

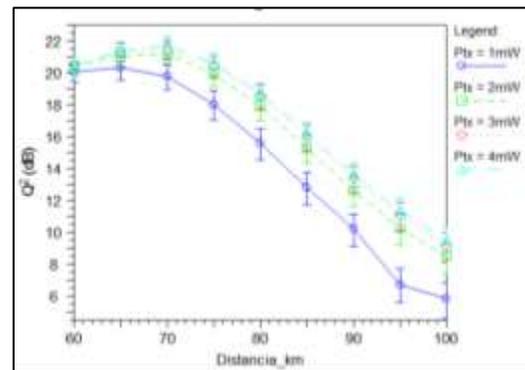
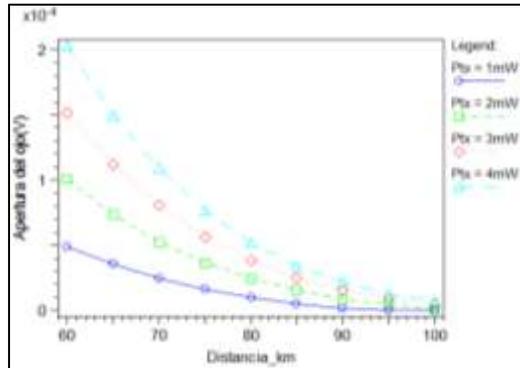


Figura 3.11. Factor Q estimado vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.



**Figura 3.12. Apertura del ojo vs Distancia. Escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK. Longitud SMF-28 de 60 a 100 km con potencia de transmisión de 1 a 4 mw.**

De la tabla 1 del anexo I y las figuras 3.10, 3.11 y 3.12, y de manera análoga al estudio realizado en la sección 3.1.2, se puede apreciar como los efectos de CD y atenuación, comprometen y limitan el desempeño del sistema, a medida que la longitud de la SMF-28 aumenta. Esta limitación es menor cuando la potencia se transmisión aumenta, sin embargo, este incremento no puede ser indiscriminado, debido a su alta dependencia con los efectos no lineales.

La tabla 3.2 resume la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación con del formato NRZ-DPSK para potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw, además de las medidas de BER estimada y factor Q estimado, bajo parámetros mínimos de desempeño de operadores WDM comerciales definidos en la sección 2.4.

Potencia de transmisión (mw)	Longitud de SMF-28 (km)	Medida de Dispersión (ps/nm)	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Potencia recibida (dBm)
1	81	1364	7.0963e-009	15.073	-20.24
2	85	1431	2.8619e-009	15.305	-18.23
3	86	1448	1.5755e-009	15.452	-16.72
4	87	1465	4.1287e-009	15.213	-15.72

**Tabla 3.2. Medidas de distancia, dispersión, BER estimada, factor Q estimado, potencia en recepción, del escenario en ausencia de técnicas de compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK para una potencia de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw.**

Finalmente, se concluye en esta sección que la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación con el formato de modulación NRZ-DPSK, para el escenario de simulación bajo criterios de una BER estimada de  $10^{-9}$  y un factor Q de 15 dB es de:

- 81 km con una dispersión acumulada de 1364 ps/nm, para una potencia mínima de 1 mw.
- 87 km con una dispersión acumulada de 1465 ps/nm, para una potencia máxima de 4 mw.

### 3.2 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD

El escenario de simulación con las técnicas de compensación óptica para la CD se clasifica en esta sección de la siguiente manera:

- La configuración 2: Escenario de simulación con técnica de pre-compensación óptica para la CD.
- La configuración 3: Escenario de simulación con técnica de post-compensación óptica para la CD.

La figura 3.13 muestra la configuración 2 del escenario de simulación con la técnica de pre-compensación óptica para la CD, en la cual se aplica ODM1. La figura 3.14 muestra la configuración 3 del escenario de simulación con la técnica de post-compensación óptica para la CD, en la cual se aplica ODM2. Nótese que las técnicas de compensación óptica para la CD se aplican en el canal de transmisión.

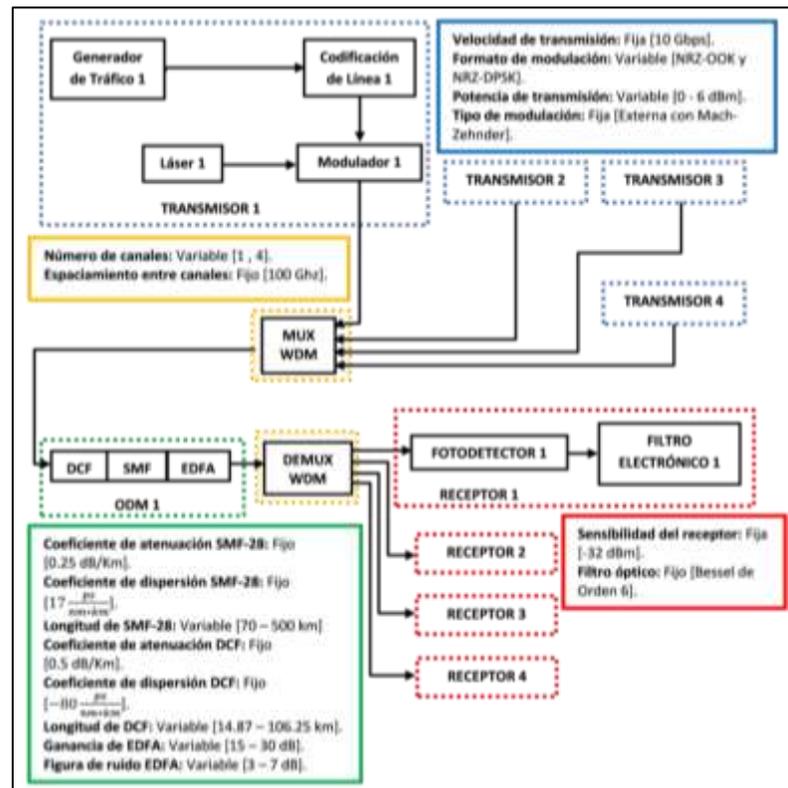


Figura 3.13. Configuración 2: escenario de simulación con la técnica de pre-compensación óptica para la CD.

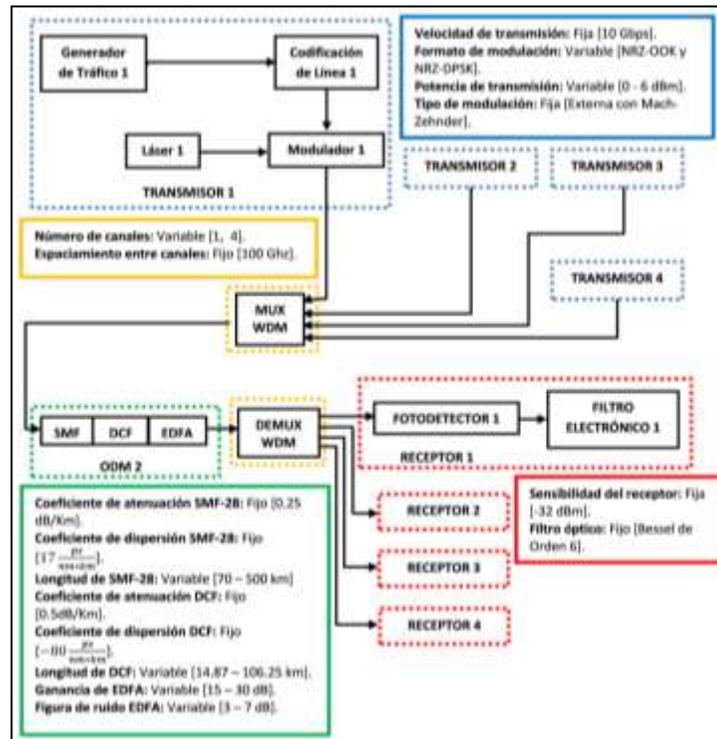


Figura 3.14. Configuración 3: escenario de simulación con la técnica de post-compensación óptica para la CD.

El desarrollo de esta sección es abordado mediante el numeral 2 del plan de evaluación y pruebas, sección 2.4, concerniente a analizar el comportamiento del escenario de simulación con las técnicas de compensación óptica para la CD, con el fin de determinar la influencia de dichas técnicas al presentar variaciones de la potencia de transmisión, longitud del span<sup>26</sup> y el número de canales, en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. Este análisis se lleva a cabo, teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño de operadores WDM comerciales definidos en la sección 2.4. En este orden de ideas, se presenta una serie de numerales que permiten dar cumplimiento al objetivo de esta sección:

- 3.2.1 Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.
- 3.2.2 Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK.
- 3.2.3 Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK.
- 3.2.4 Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK.

Como ya se mencionó y clasificando cada uno de los numerales de esta sección, el objetivo de los mismos es analizar el desempeño de las técnicas de compensación óptica para la CD, bajo la influencia de variaciones de la potencia de transmisión, longitud del span (numerales 3.2.1 y 3.2.3), y número de canales (numerales 3.2.2 y 3.2.4).

<sup>26</sup> La longitud del span se constituye por la longitud de SMF-28 y DCF.

A continuación se detallan los rangos e incrementos de los parámetros establecidos en las simulaciones:

- La potencia de transmisión en un rango de a 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw.
- La longitud de la SMF-28 en un rango de 70 a 120 km con incrementos de 5 km para las técnicas de compensación ópticas para la CD con formato de modulación NRZ-OOK (numerales 3.2.1 y 3.2.2). Para las técnicas de compensación ópticas para la CD con los formatos de modulación NRZ-DPSK se define la longitud de la SMF-28 en un rango de 80 a 130 km con incrementos de 5 km (numerales 3.2.3 y 3.2.4). Los límites inferiores son establecidos en base a la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación, con los formatos de modulación NRZ-OOK (70 km) y NRZ-DPSK (80 km), conforme a los numerales 3.1.1 y 3.1.2 de la sección 3.1 para una potencia de 1 mw. Los límites superiores se fundamentan en estudios concernientes a las técnicas de compensación ópticas para la CD con formatos de modulación NRZ-OOK (120 km) y NRZ-DPSK (130 km), conforme a la sección 1.3.

La tabla 3.3, muestra la DCF necesaria para compensar al 100% la CD acumulada en el rango e incrementos de SMF-28 mencionados anteriormente para las configuraciones de pre-compensación y post-compensación óptica para la CD. Estas técnicas son simuladas teniendo en cuenta que se hace un 80% de compensación de la dispersión, debido a que los operadores WDM comerciales, por razones de costos en la adquisición de DCF's no realizan la compensación al 100%.

Longitud de SMF-28 (km)	Longitud de DCF (km)
70	14.87
75	15.93
80	17
85	18.06
90	19.12
95	20.18
100	21.25
105	22.31
110	23.37
115	24.43
120	25.5
125	26.56
130	27.62

**Tabla 3.3. DCF necesaria para compensar la CD acumulada en el rango e incrementos de SMF-28 mencionados anteriormente para las técnicas de compensación ópticas para la CD.**

El canal implementado en las técnicas de compensación ópticas para la CD mono canal hace referencia al canal 18 (1547.72 nm). Para las técnicas de compensación ópticas para la CD de cuatro canales se implementan las longitudes de onda 1547.72 nm (ch:18), 1548.52 nm (ch:19), 1549.32 nm (ch:20) y 1550.12 nm (ch:21); estos valores van acordes a la tabla 1.8. La potencia de transmisión, longitud del span y número de spans de los numerales 3.2.2 y 3.2.4, se definen en base al análisis de los numerales 3.2.1 y 3.2.3.

### 3.2.1 Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

Las figuras 3.15 y 3.16 muestran la técnica de pre y post compensación óptica para la CD, para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementadas en OptSim.

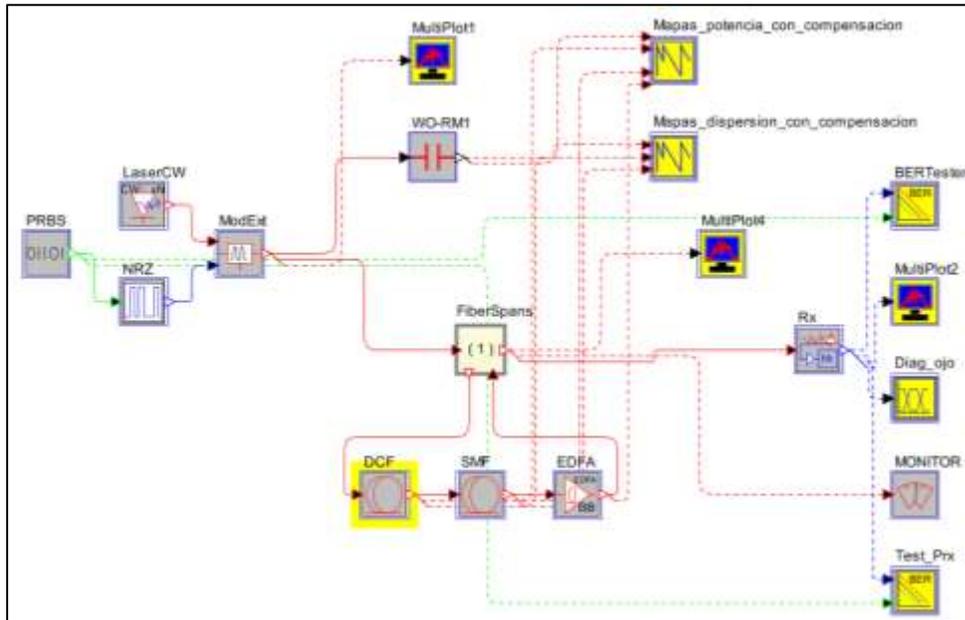


Figura 3.15. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

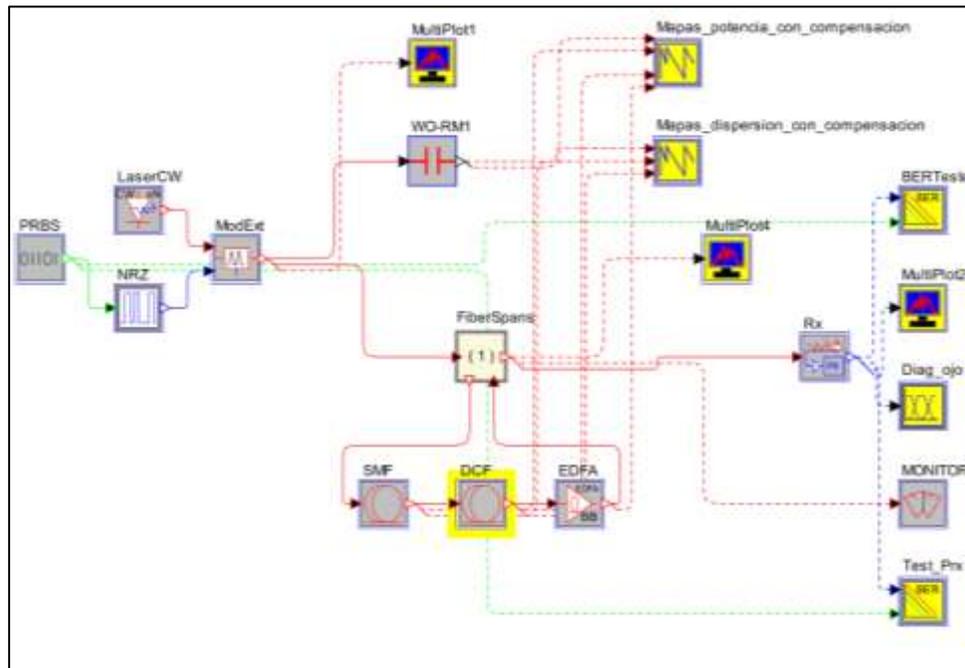


Figura 3.16. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

Las tablas 1 y 2 de los anexos K y L, y las figuras 3.17, 3.18, muestran respectivamente las medidas de BER estimada de las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Es necesario realizar un fraccionamiento de la longitud de la SMF-28 en un rango de 70 a 100 km, y de 110 a 120 km. Esto se debe a que OptSim no genera medidas de BER estimada para longitudes superiores a los 110 km, ya que con 1 mw, no se pueden alcanzar dichas distancias.

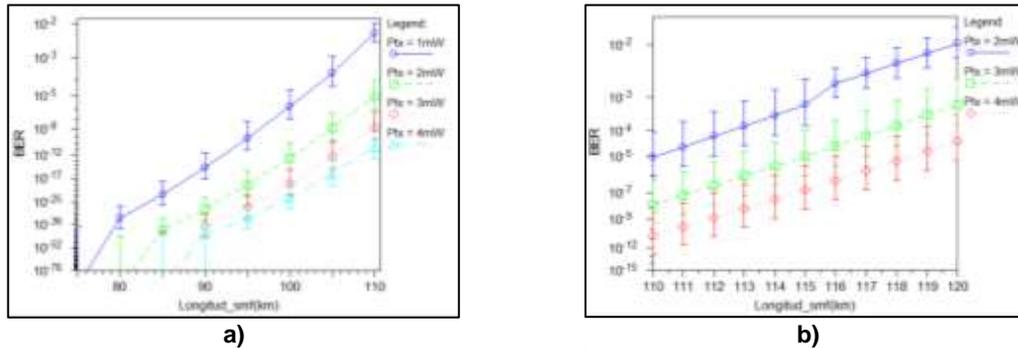


Figura 3.17. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK con a) Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 70 a 110 km con incrementos de 5 km, b) Potencia de transmisión de 2 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 110 a 120 km con incrementos de 1km.

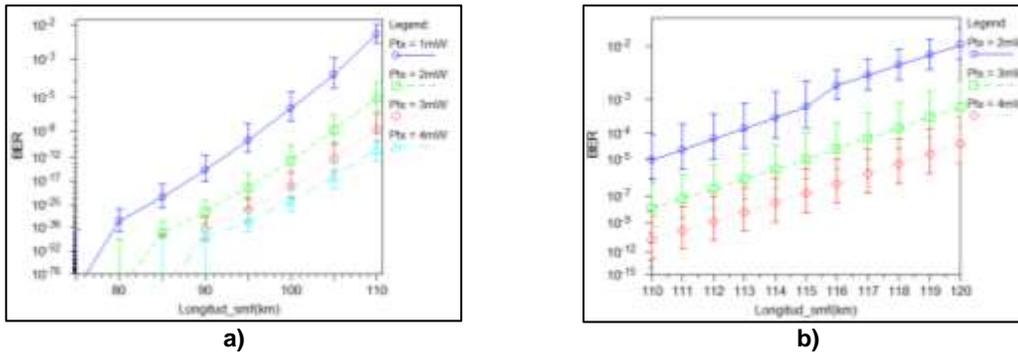


Figura 3.18. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK con a) Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 70 a 110 km con incrementos de 5 km, b) Potencia de transmisión de 2 a 4 mw con incrementos de 1 mw para una longitud de SMF-28 de 110 a 120 km con incrementos de 1km.

Las figuras 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24, muestran las medidas de factor Q estimado, OSNR y apertura del ojo de las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK, para una potencia de transmisión de 1 a 4 mw, conforme a las variaciones de longitud establecidas en la tabla 3.3.

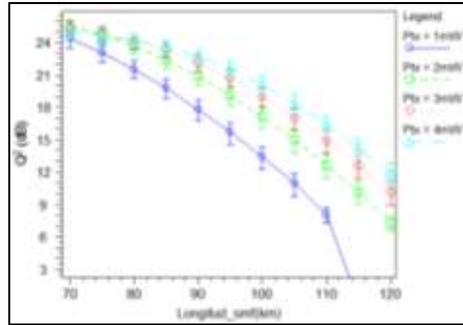


Figura 3.19. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km.

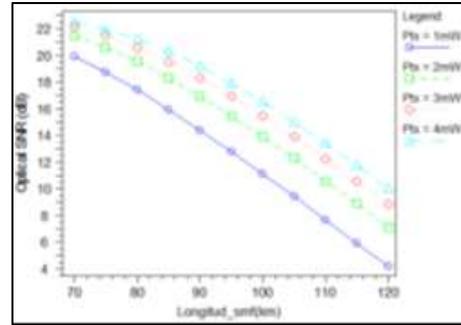


Figura 3.20. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km.

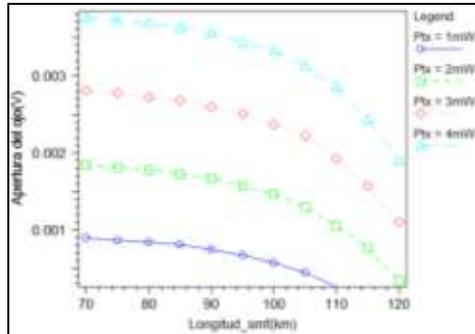


Figura 3.21. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km.

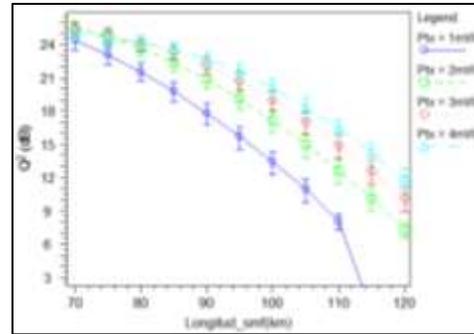


Figura 3.22. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km.

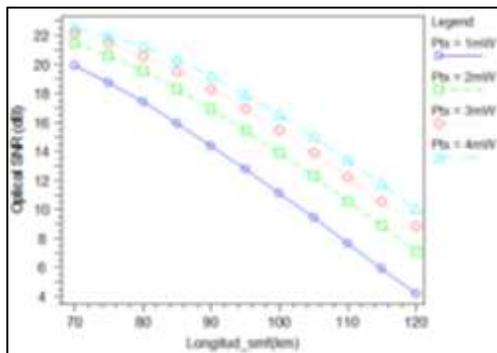


Figura 3.23. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km.

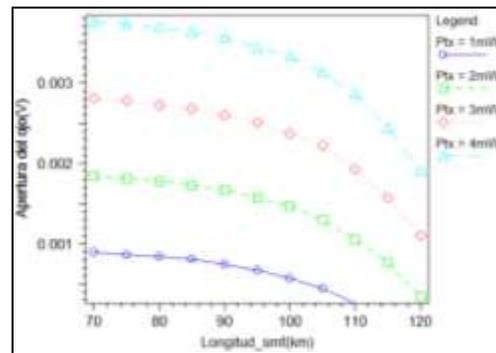


Figura 3.24. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km.

De las tablas 1 y 2 de los anexos K y L, y las figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24, se puede apreciar como con la ODM<sup>27</sup> se alcanzan distancias mayores, a la determinada en la sección 3.1.1, sin embargo, existen longitudes límites de SMF-28, que a pesar de ser compensadas no presentan un desempeño mínimo. Otro aspecto que limita el desempeño de la red, es la introducción del tramo de DCF, caracterizado por presentar altas perdidas por atenuación; estos efectos de atenuación y dispersión contribuyen al deterioro de la señal. Por otro lado, es claro que para mayores valores de potencia ese deterioro de la señal presenta mejorías, sin embargo, estos incrementos de potencia no pueden ser indiscriminados, debido a su alta relación con los efectos no lineales.

Las figuras 3.25 y 3.26 muestran respectivamente el mapa de dispersión de las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

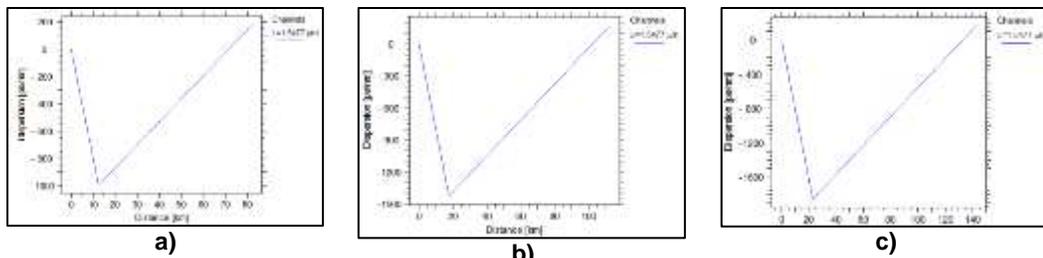


Figura 3.25. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

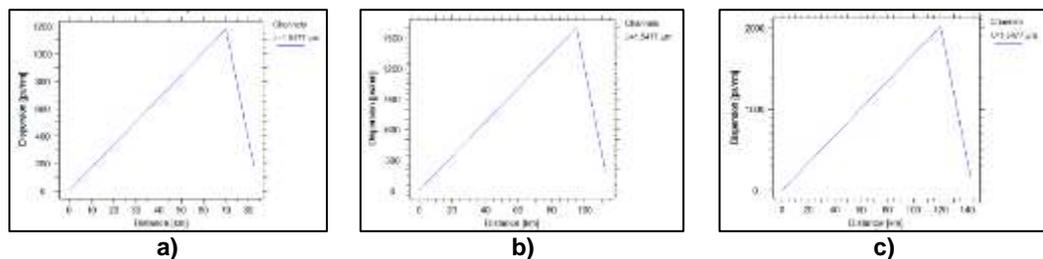


Figura 3.26. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

De la figura 3.25 se puede apreciar el mapa de dispersión, el cual muestra la variación de la CD en función de las variaciones de longitud del span, determinado por la longitud de la SMF-28 y DCF. Inicialmente la pendiente negativa de cada mapa de dispersión, representa el efecto pre-compensador de la CD impuesto por la DCF, al tener una dispersión elevada y de signo contrario a la generada por la SMF-28 (representada por la pendiente positiva). De la figura 3.26 inicialmente la pendiente positiva de cada mapa de dispersión, representa la dispersión acumulada de la fibra SMF-28 que es posteriormente compensada por la DCF introduciendo

<sup>27</sup> ODM: Temática en la que se enmarcan las técnicas de compensación ópticas para la CD.

una dispersión elevada y de signo contrario a la generada por la SMF-28 (representada por la pendiente negativa). De las figuras 3.25 y 3.26, se puede observar que a mayores longitudes de SMF-28, mayor es la cantidad de CD acumulada a ser compensada y por lo tanto mayor es la longitud del span a ser desplegada en un enlace óptico.

Las figuras 3.27 y 3.28 muestran respectivamente el mapa de dispersión de las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

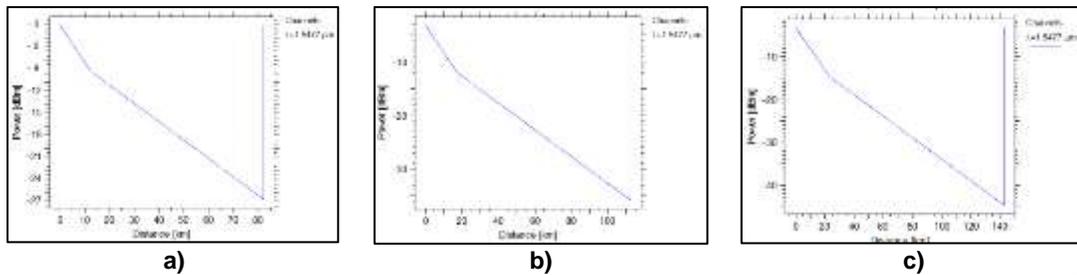


Figura 3.27. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

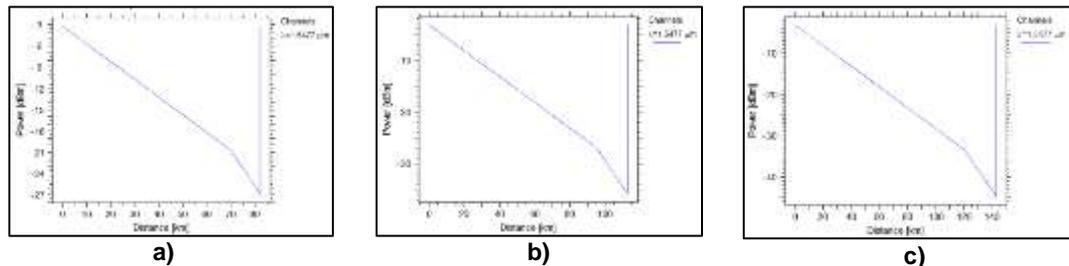


Figura 3.28. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

De la figura 3.27 se puede apreciar inicialmente una caída rápida de potencia (representada por la pendiente más inclinada), debida a la alta atenuación impuesta por la DCF, posteriormente, la SMF-28 introduce una atenuación menor a la impuesta por la DCF (representada por la pendiente menos inclinada). Estas altas pérdidas por atenuación, son compensadas de manera eficiente por medio del EDFA, teniéndose en cuenta que mientras mayor sea la longitud del span, se requiere más ganancia del EDFA para compensar dichas pérdidas, un incremento indiscriminado de la ganancia refleja una degradación de la OSNR. De la figura 3.28 se puede apreciar inicialmente una caída lenta de potencia (representada por la pendiente menos inclinada), debida a la atenuación impuesta por la SMF-28, posteriormente, se muestra una caída rápida de potencia impuesta por la DCF (representada por la pendiente más inclinada) debido a su alta atenuación. Estas pérdidas por atenuación impuestas por la SMF-28 y DCF, son compensadas de

manera eficiente por medio del EDFA, teniendo en cuenta que mientras mayor sea la longitud del span, se requiere más ganancia del EDFA para compensar dichas pérdidas, un incremento indiscriminado de la ganancia refleja una degradación de la OSNR.

Las figuras 3.29 y 3.30 muestran respectivamente el diagrama del ojo de las configuraciones 2 y 3 mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

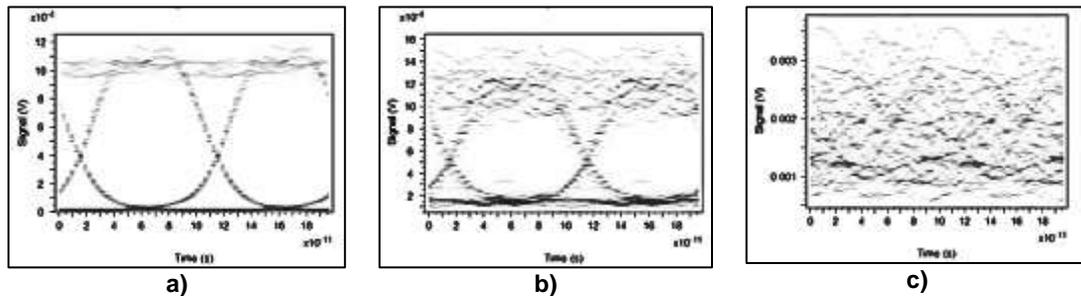


Figura 3.29. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

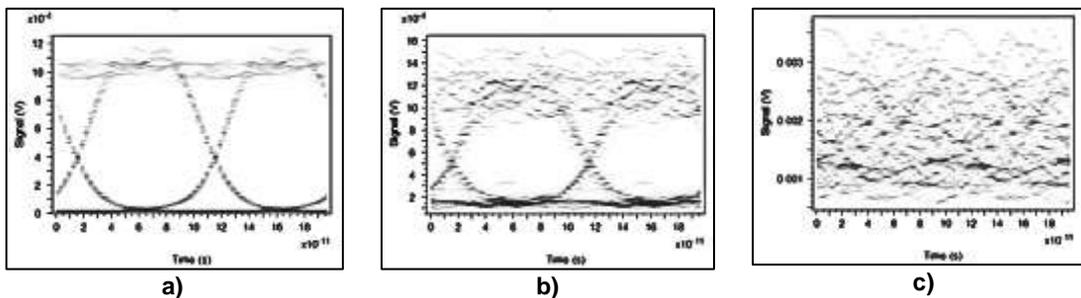


Figura 3.30. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

Las figuras 3.29 y 3.30 permiten apreciar, que la cantidad de DCF calculada para compensar la CD en un tramo de SMF-28 determinado, no siempre es suficiente para mejorar el desempeño del sistema. Los ojos muestran que las marcas de los unos (nivel de amplitud de la señal) son mantenidas por el EDFA, pero el jitter e incremento de la BER, son inevitables debido al excesivo incremento en la longitud de la SMF-28.

La figura 3.31 muestra el espectro óptico a la salida del modulador. Las figuras 3.29 y 3.30 muestran respectivamente el espectro óptico antes del receptor de las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

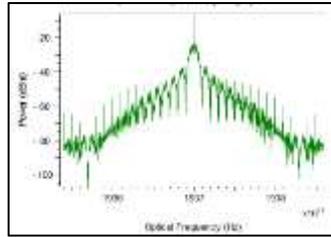


Figura 3.31. Espectro óptico a la salida del modulador. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a una potencia de transmisión de 1 mw.

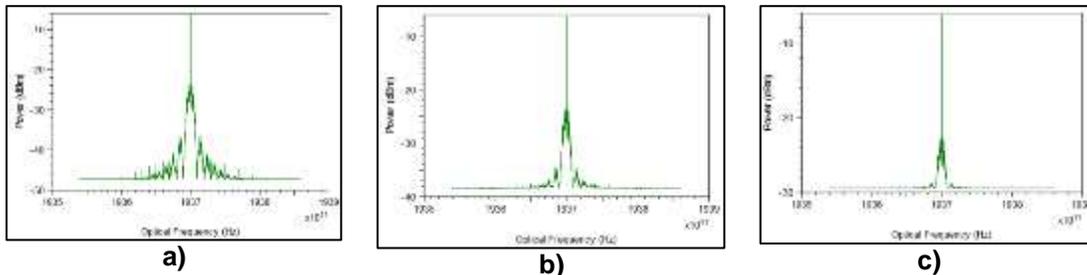


Figura 3.32. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de pre-compensación óptica para la CD para 1 span, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

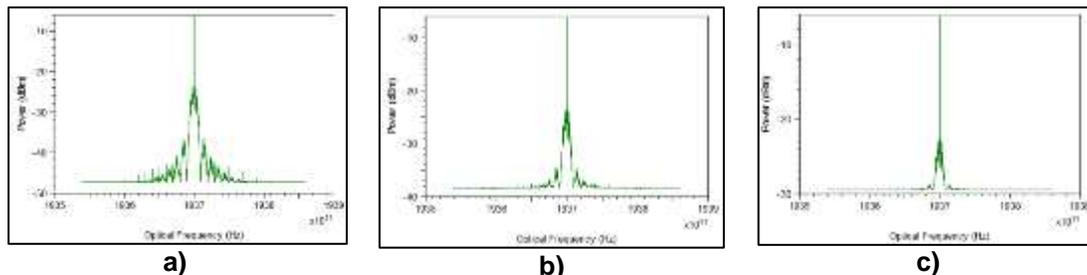


Figura 3.33. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 70 km, b) Longitud de SMF-28 de 95 km, c) Longitud de SMF-28 de 120 km.

Un análisis comparativo de la figura 3.31 con las figuras 3.32 y 3.33 muestra una compresión del espectro original, conllevando a la pérdida de componentes significativas; hecho producido por una dispersión residual al final del enlace diferente de cero, Figs. 3.25 y 3.26. Por otro lado se corrobora la deformación espectral del pulso óptico conforme se propaga por la fibra óptica, limitando las distancias de transmisión, en una relación directamente proporcional con la CD.

Las tablas 3.4 y 3.5 resumen respectivamente la máxima longitud SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw, aplicando las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cumpliendo con los parámetros de desempeño mínimos establecidos por operadores WDM comerciales, sección 2.4.

Esta longitud se establece a través de medidas de dispersión residual, BER estimada y factor Q estimado.

Potencia de transmisión (mw)	Longitud de SMF-28 (km)	Dispersión Residual (ps/nm)	BER estimada (dB)	Factor Q estimado (dB)
1	95	173	5.9611e-009	15.680
2	105	172	1.1018e-009	14.956
3	110	171	1.3678e-009	14.898
4	112	170	1.2103e-009	15.515

Tabla 3.4. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

Potencia de transmisión (mw)	Longitud de SMF-28 (km)	Dispersión Residual (ps/nm)	BER estimada (dB)	Factor Q estimado (dB)
1	95	175	5.7557e-009	15.688
2	105	172	1.0731e-009	14.963
3	110	170	1.2748e-009	14.917
4	112	170	9.0687e-009	15.583

Tabla 3.5. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de post compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

### 3.2.2 Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK.

Para el análisis de esta sección inicialmente se procede a cubrir la longitud total del enlace (500 km). Se establece una longitud de SMF-28 acorde al rango impuesto por la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación, con el formato de modulación NRZ-OOK a una potencia mínima de 1 mw, tabla 3.1. La longitud del span está definida por 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF, para un total de 84.875 km.

Las figuras 3.34 y 3.35 muestran respectivamente las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, para un número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK, implementadas en OptSim.

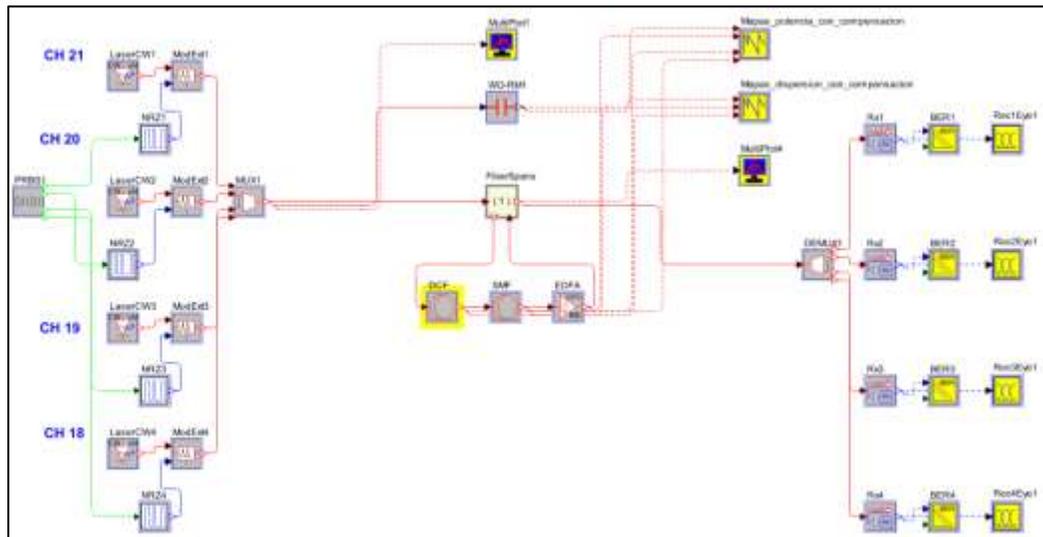


Figura 3.34. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

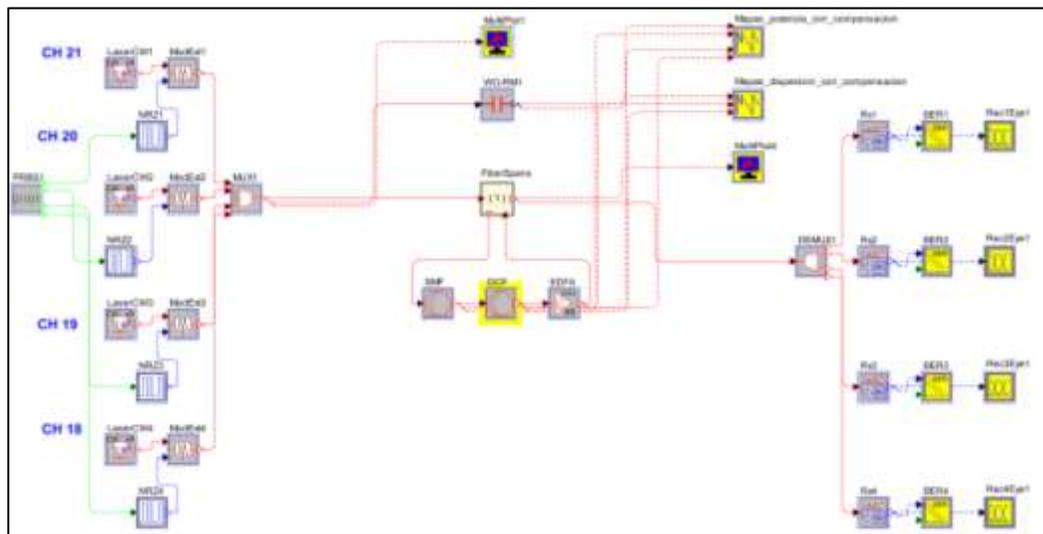


Figura 3.35. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

Las tablas 3.6, 3.7 y las figuras 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 y 3.41 muestran las medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para alcanzar la longitud total del enlace de 500 km en las configuraciones 2 y 3, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. El canal analizado es el 18.

Número de Spans	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	OSNR (dB)
1	2.0556e-061	24.346	19.89591
2	1.4183e-032	21.457	17.34071
3	2.0622e-021	19.490	15.72615
4	8.2321e-016	18.024	14.54777
5	6.7490e-013	17.012	13.62002
6	3.5677e-010	15.796	12.85464
7	1.2838e-008	14.915	12.20298

Tabla 3.6. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK.

Número de Spans	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	OSNR (dB)
1	9.6795e-067	24.720	19.89471
2	1.3656e-034	21.735	17.33941
3	2.0089e-022	19.709	15.72453
4	2.2759e-016	18.194	14.54583
5	3.5070e-013	17.121	13.61763
6	2.7548e-010	15.853	12.85186
7	1.2931e-008	14.913	12.20003

Tabla 3.7. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK.

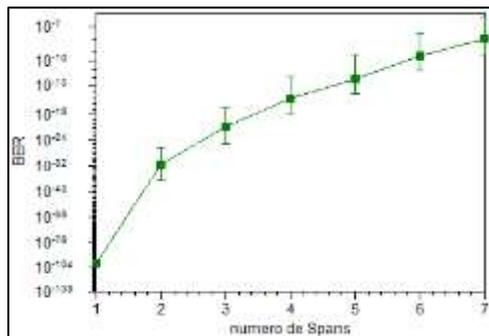


Figura 3.36. BER estimada vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

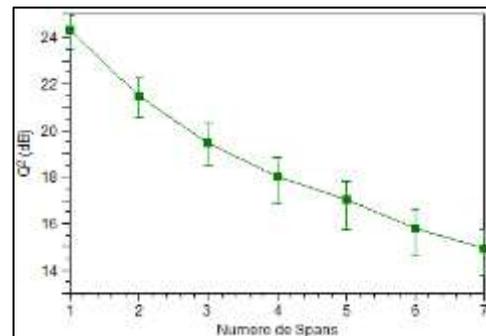


Figura 3.37. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

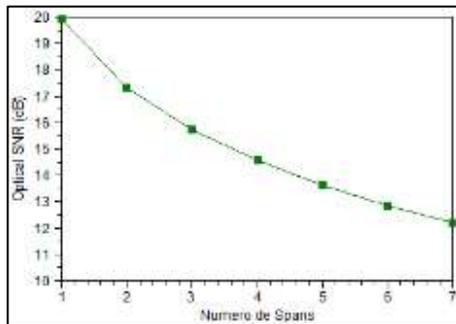


Figura 3.38. OSNR vs Número de Spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

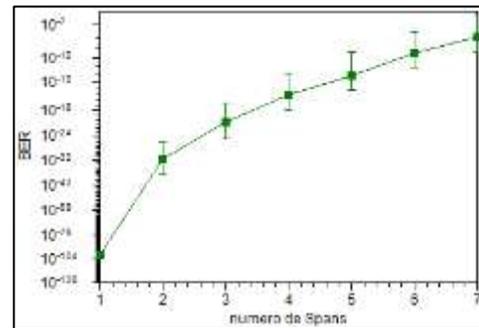


Figura 3.39. BER estimada vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

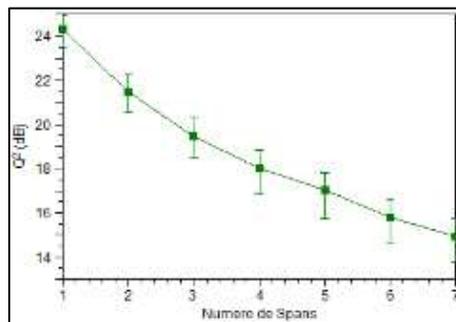


Figura 3.40. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

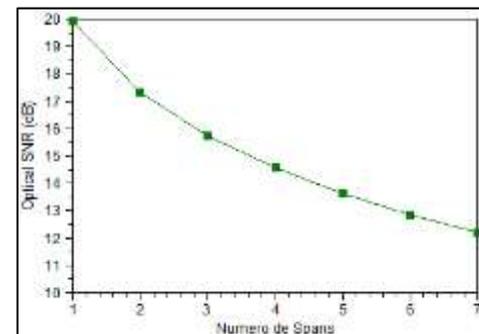


Figura 3.41. OSNR vs Número de Spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

Las tablas 3.6, 3.7 y las figuras 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 y 3.41, muestran como el incremento del número de spans deterioran el desempeño del sistema. El deterioro es originado por el aumento de la longitud del enlace, la atenuación introducida por la SMF-28 y DCF, y el ruido adicionado por el aumento del número de EDFAs. A través de este análisis se determina que el máximo número de spans cumpliendo con parámetros de desempeño mínimos y sin necesidad de utilizar un regenerador óptico es de 6 spans correspondientes a 420 km de SMF-28. La longitud total del enlace de 500 km no se alcanza a cubrir.

Las tablas 3.8 y 3.9, muestran las medidas de BER estimada y Factor Q estimado de cada uno de los canales implementados en las técnicas de compensación óptica para la CD con cuatro canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK. Se observa que las variaciones de BER estimado y factor Q estimado, no son tan significativas de un canal a otro, esto se debe a la elección de canales consecutivos y al espaciamiento entre ellos.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)
18	7.9539e-010	6.0349
19	5.0589e-010	6.1075
20	9.5519e-010	6.0052
21	7.8321e-010	6.0374

Tabla 3.8. BER estimada y factor Q estimado. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)
18	4.4123e-009	5.7519e+000
19	2.0343e-009	5.8814e+000
20	3.5067e-009	5.7906e+000
21	3.5089e-009	5.7905e+000

Tabla 3.9. BER estimada y factor Q estimado. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF.

Las figura 3.42 y 3.43 muestran el mapa de dispersión de las técnicas de compensación óptica para la CD, con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.

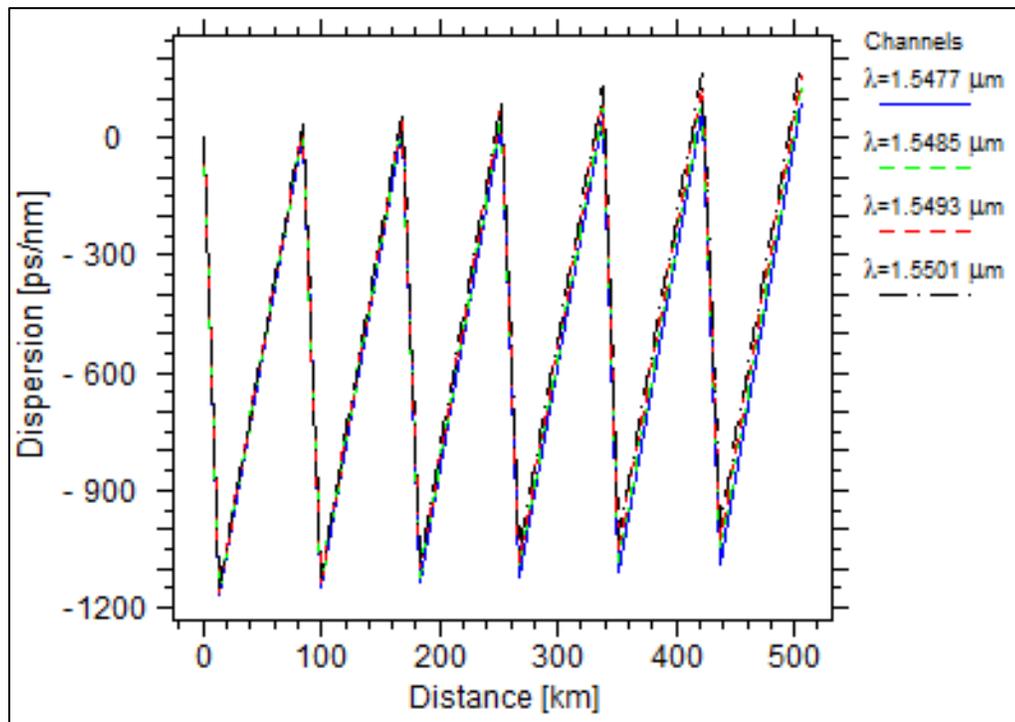


Figura 3.42. Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.

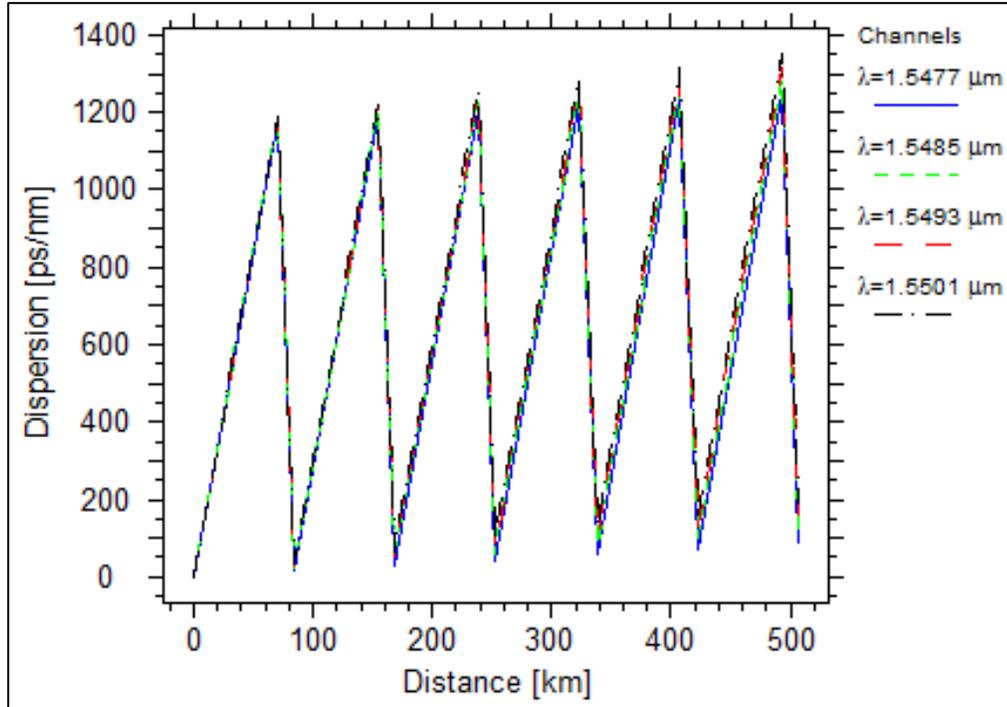


Figura 3.43. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, formato de modulación NRZ-OOK y 6 spans.

Se procede a realizar un acercamiento de las figura 3.42 y 3.43, para poder determinar la dispersión residual de un span (primer span), fig. 3.44 y fig. 4.46, y la dispersión residual acumulada al final del enlace, fig. 3.45 y fig.3.47, con el fin de destacar la dependencia de la CD con respecto al número de canales.

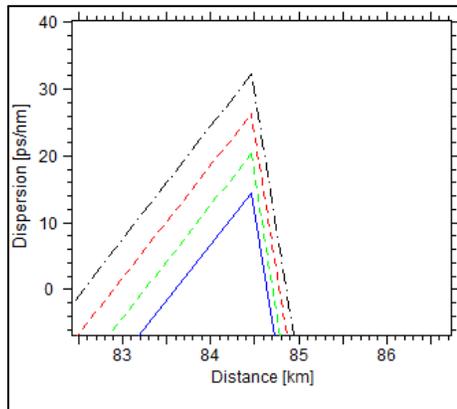


Figura 3.44. Dispersión residual del primer span para la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.

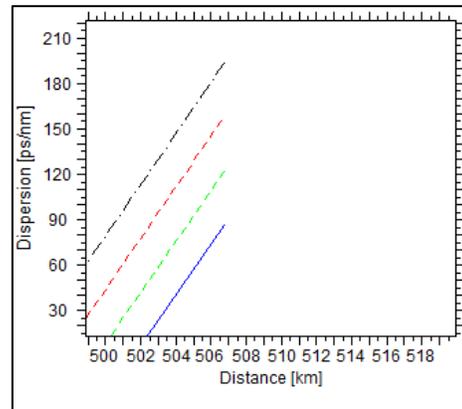


Figura 3.45. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK.

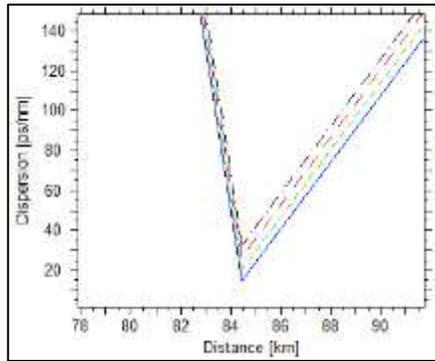


Figura 3.46. Dispersión residual del primer span para la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK.

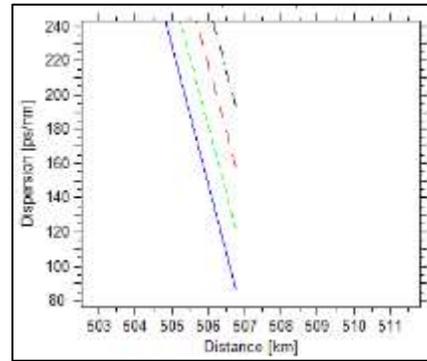


Figura 3.47. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK.

De las figuras 3.42 y 3.43 es notorio que cada canal cuenta con una dispersión residual por span distinta, figs. 3.44, 3.45, 3.46 y 3.47, debido a la relación proporcional de la CD con la longitud de onda seleccionada por cada canal, tablas 3.10 y 3.11.

Canal	Dispersión residual (ps/nm)					
	Span 1	Span 2	Span 3	Span 4	Span 5	Span 6
18	14	28	43	57	71	86
19	20	40	60	81	101	121
20	26	52	78	104	131	157
21	32	64	96	128	160	193

Tabla 3.10. Dispersión residual por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK.

Canal	Dispersión residual (ps/nm)					
	Span 1	Span 2	Span 3	Span 4	Span 5	Span 6
18	14	28	43	58	72	86
19	20	40	61	81	101	122
20	26	52	79	104	132	157
21	32	64	96	128	161	193

Tabla 3.11. Dispersión residual por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-OOK.

La dispersión residual acumulada al final del enlace de los canales 18, 19, 20 y 21 para las técnicas de compensación óptica para la CD, con cuatro canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK hace referencia a la columna span 6 de las tablas 3.10 y 3.11 respectivamente. Las figuras 1 de los anexos M y N muestran el diagrama del ojo de los canales 18 y 21 para las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, con cuatro canales, 6 spans y formato de modulación NRZ-OOK respectivamente. En estos diagramas de ojo no se observan significativas variaciones de un canal al otro.



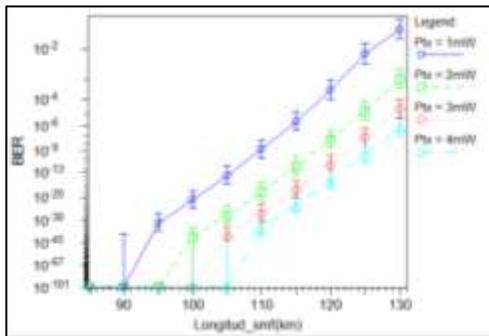


Figura 3.50. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

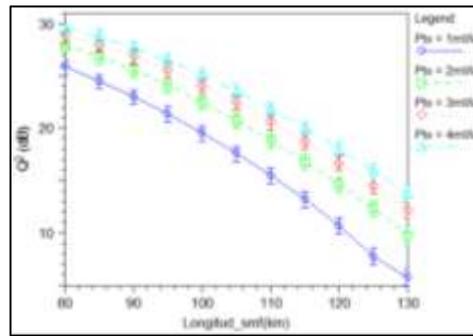


Figura 3.51. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

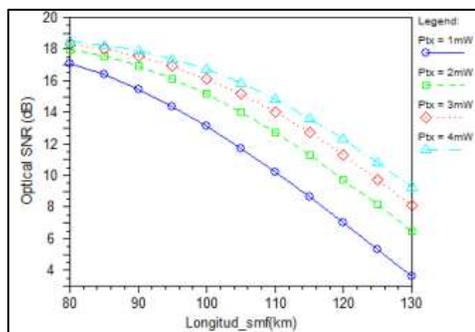


Figura 3.52. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

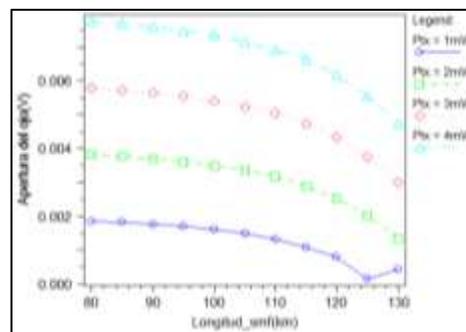


Figura 3.53. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

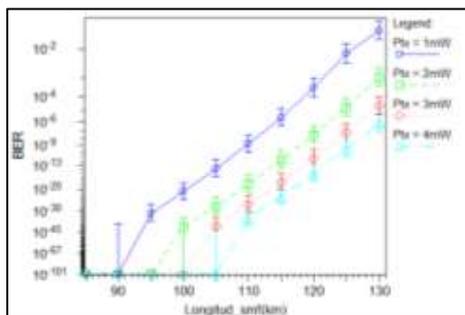


Figura 3.54. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

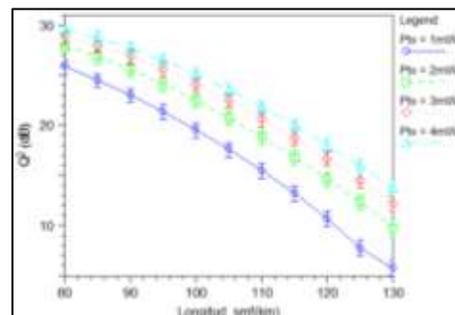


Figura 3.55. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con variaciones de 5 km.

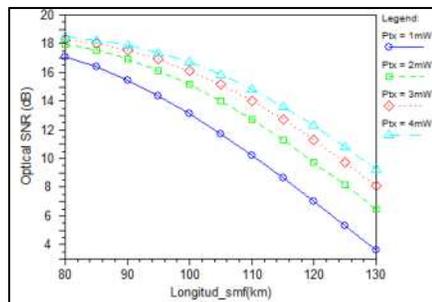


Figura 3.56. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

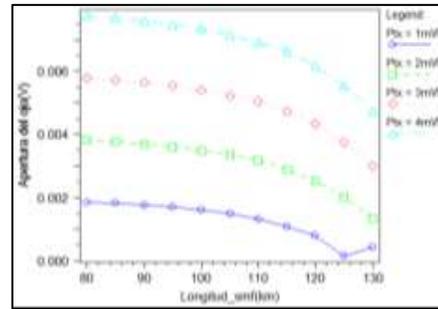


Figura 3.57. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

De las figuras 3.50, 3.51, 3.52, 3.53, 3.54, 3.55, 3.56, 3.57 y las tablas 1 y 2 de los anexos Ñ y O, se puede apreciar como con la ODM se alcanzan distancias mayores, a la determinada en la tolerancia a la CD del formato de modulación NRZ-DPSK, sección 3.1.2, sin embargo, existen longitudes límites de SMF-28, que a pesar de ser compensadas no presentan un desempeño mínimo. Otro aspecto que limita el desempeño de la red, es la introducción del tramo de DCF, caracterizado por presentar altas pérdidas por atenuación; estos efectos de atenuación y dispersión contribuyen al deterioro de la señal. Por otro lado, es claro que para valores mayores de potencia ese deterioro de la señal presenta mejorías, sin embargo, estos incrementos de potencia no pueden ser indiscriminados, debido a su alta relación con los efectos no lineales.

Las figuras 3.58 y 3.59 muestran respectivamente el mapa de dispersión de las configuraciones 2 y 3 mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK.

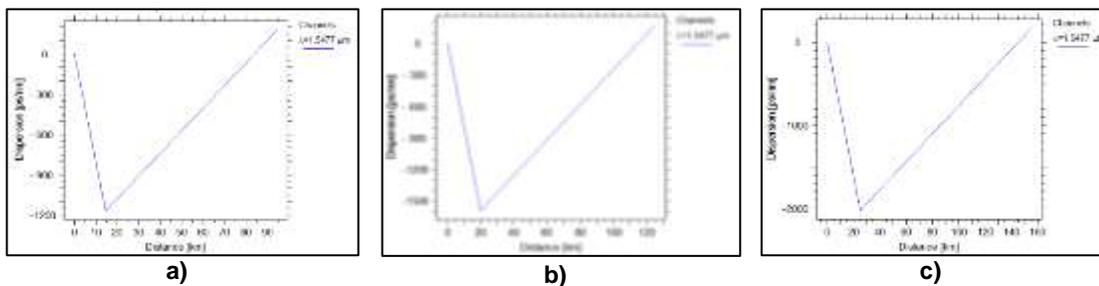


Figura 3.58. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

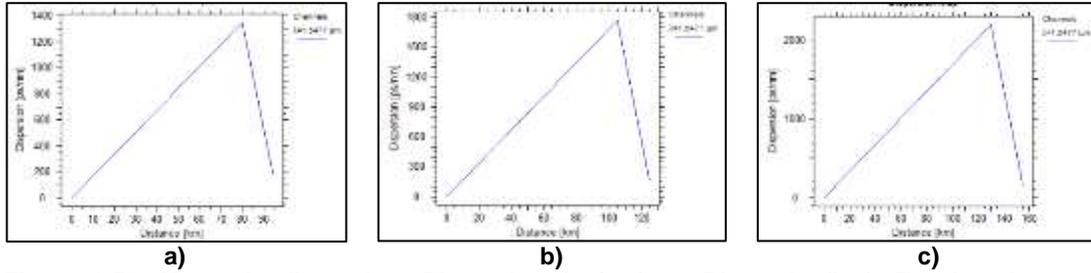


Figura 3.59. Mapa de dispersión. Dispersión (ps/nm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

De la figura 3.58 se puede apreciar el mapa de dispersión, el cual muestra la variación de la CD en función de las variaciones de longitud del span, determinado por la longitud de la SMF-28 y DCF. Inicialmente la pendiente negativa de cada mapa de dispersión, representa el efecto pre-compensador de la CD impuesto por la DCF, al tener una dispersión elevada y de signo contrario a la generada por la SMF-28 (representada por la pendiente positiva). De la figura 3.59 inicialmente la pendiente positiva de cada mapa de dispersión, representa la dispersión acumulada de la fibra SMF-28 que es posteriormente compensada por la DCF introduciendo una dispersión elevada y de signo contrario a la generada por la SMF-28 (representada por la pendiente negativa). De las figuras 3.58 y 3.59, se puede observar que a mayores longitudes de SMF-28, mayor es la cantidad de CD acumulada a ser compensada y por lo tanto mayor es la longitud del span a ser desplegada en un enlace óptico.

Las figuras 3.60 y 3.61 muestran respectivamente el mapa de dispersión de las configuraciones 2 y 3 mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK.

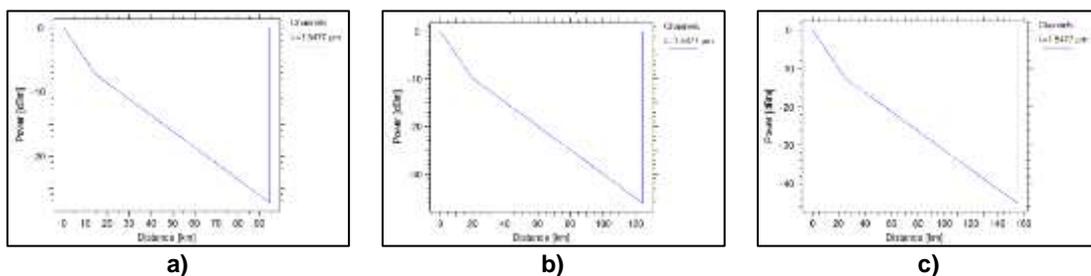


Figura 3.60. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

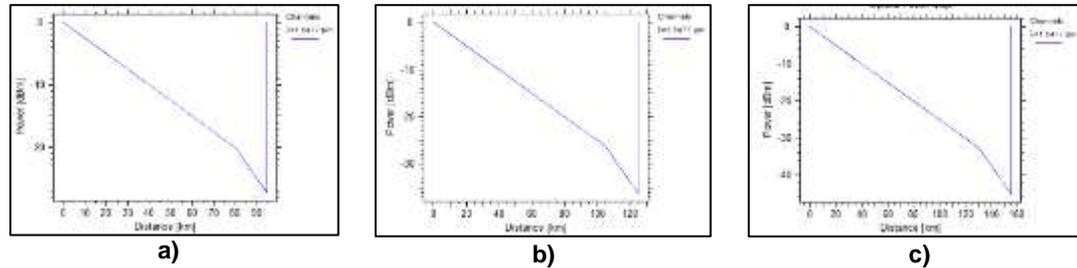


Figura 3.61. Mapa de potencia. Potencia (dBm) vs Distancia (km). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

De la figura 3.60 se puede apreciar inicialmente una caída rápida de potencia (representada por la pendiente más inclinada), debida a la alta atenuación impuesta por la DCF, posteriormente, la SMF-28 introduce una atenuación menor a la impuesta por la DCF (representada por la pendiente menos inclinada). Estas altas pérdidas por atenuación, son compensadas de manera eficiente por medio del EDFA, teniéndose en cuenta que mientras mayor sea la longitud del span, se requiere más ganancia del EDFA para compensar dichas pérdidas, un incremento indiscriminado de la ganancia refleja una degradación de la OSNR. De la figura 3.61 se puede apreciar inicialmente una caída lenta de potencia (representada por la pendiente menos inclinada), debida a la atenuación impuesta por la SMF-28, posteriormente, se muestra una caída rápida de potencia impuesta por la DCF (representada por la pendiente más inclinada) debido a su alta atenuación. Estas pérdidas por atenuación impuestas por la SMF-28 y DCF, son compensadas de manera eficiente por medio del EDFA, teniéndose en cuenta que mientras mayor sea la longitud del span, se requiere más ganancia del EDFA para compensar dichas pérdidas, un incremento indiscriminado de la ganancia refleja una degradación de la OSNR.

Las figuras 3.62 y 3.63 muestran respectivamente el diagrama del ojo de las configuraciones 2 y 3 mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

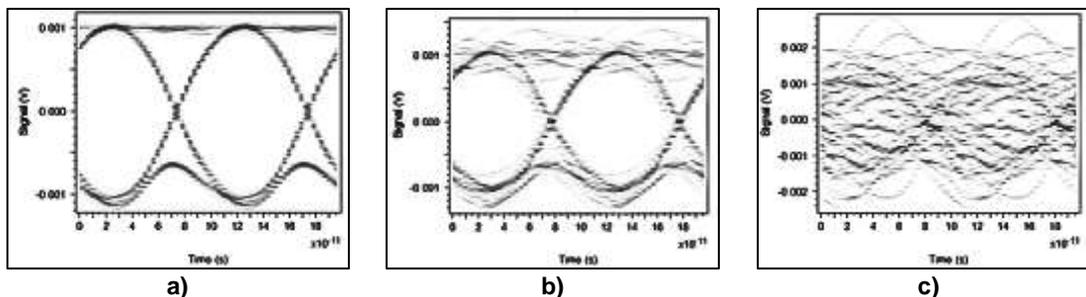


Figura 3.62. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

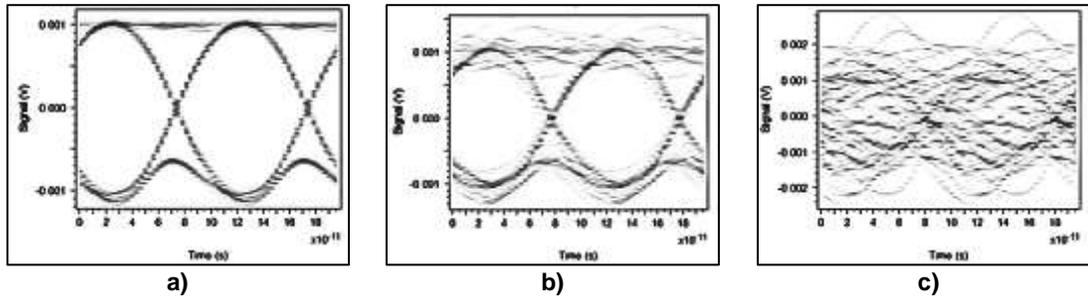


Figura 3.63. Diagrama del ojo. Señal (v) vs Tiempo (s). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

Las figuras 3.62 y 3.63 permiten apreciar, que la cantidad de DCF calculada para compensar la CD en un tramo de SMF-28 determinado, no siempre es suficiente para mejorar el desempeño del sistema. Los ojos muestran que las marcas de los unos (nivel de amplitud de la señal) son mantenidas por el EDFA, pero el jitter e incremento de la BER, son inevitables debido al excesivo incremento en la longitud de la SMF-28.

La figura 3.64 muestra el espectro óptico a la salida del modulador. Las figuras 3.65 y 3.66 muestran respectivamente el espectro óptico antes del receptor de las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD mono canal, para 1 span y formato de modulación NRZ-OOK.

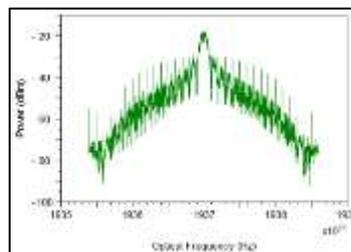


Figura 3.64. Espectro óptico a la salida del modulador. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK a una potencia de transmisión de 1 mw.

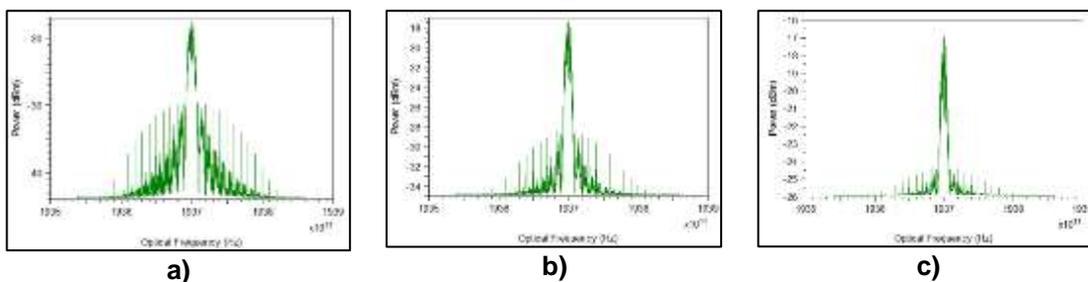


Figura 3.65. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de pre-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

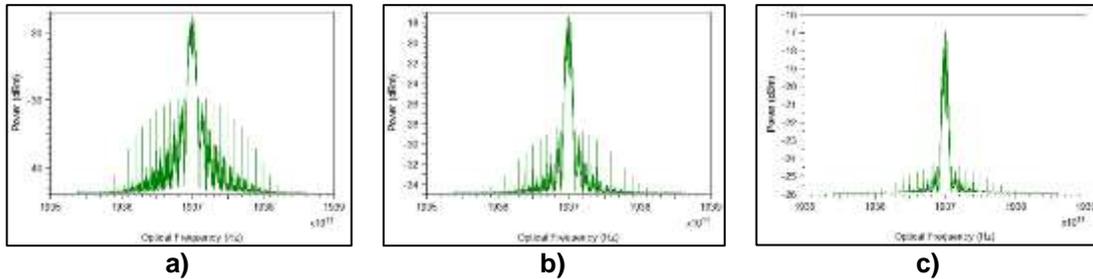


Figura 3.66. Espectro óptico antes del receptor. Potencia (dBm) vs Frecuencia óptica (Hz). Técnica de post-compensación óptica para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de 1 mw para una, a) Longitud de SMF-28 de 80 km, b) Longitud de SMF-28 de 105 km, c) Longitud de SMF-28 de 130 km.

Un análisis comparativo de la figura 3.64 con las figuras 3.65 y 3.66 muestra una compresión del espectro original, conllevando a la pérdida de componentes significativas; hecho producido por una dispersión residual al final del enlace diferente de cero, figs. 3.58 y 3.59. Por otro lado se corrobora la deformación espectral del pulso óptico conforme se propaga por la fibra óptica, limitando las distancias de transmisión, en una relación directamente proporcional con la CD.

Las tablas 3.12 y 3.13 resumen respectivamente la máxima longitud SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw, aplicando las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cumpliendo con los parámetros de desempeño mínimos establecidos por operadores WDM comerciales, sección 2.4. Esta longitud se establece a través de medidas de dispersión residual, BER estimada y factor Q estimado.

Potencia de transmisión (mw)	Distancia (km)	Dispersión residual (ps/nm)	BER estimada (dB)	Factor Q estimado (dB)
1	110	170	15.104	15.462
2	120	168	33.581	14.646
3	125	167	54.973	14.501
4	125	166	19.365	15.930

Tabla 3.12. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de pre-compensación ópticas para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK.

Potencia de transmisión (mw)	Distancia (km)	Dispersión residual (ps/nm)	BER estimada (dB)	Factor Q estimado (dB)
1	110	167	1.4329e-009	15.474
2	120	165	2.9149e-009	14.686
3	125	167	4.3574e-009	14.570
4	125	167	1.2378e-009	16.026

Tabla 3.13. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw. Técnica de post-compensación ópticas para la CD mono canal, 1 span y formato de modulación NRZ-DPSK.

### 3.2.4 Técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK.

Las figuras 3.67 y 3.68 muestran respectivamente las técnicas de pre y post compensación óptica para CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK, implementadas en OptSim.

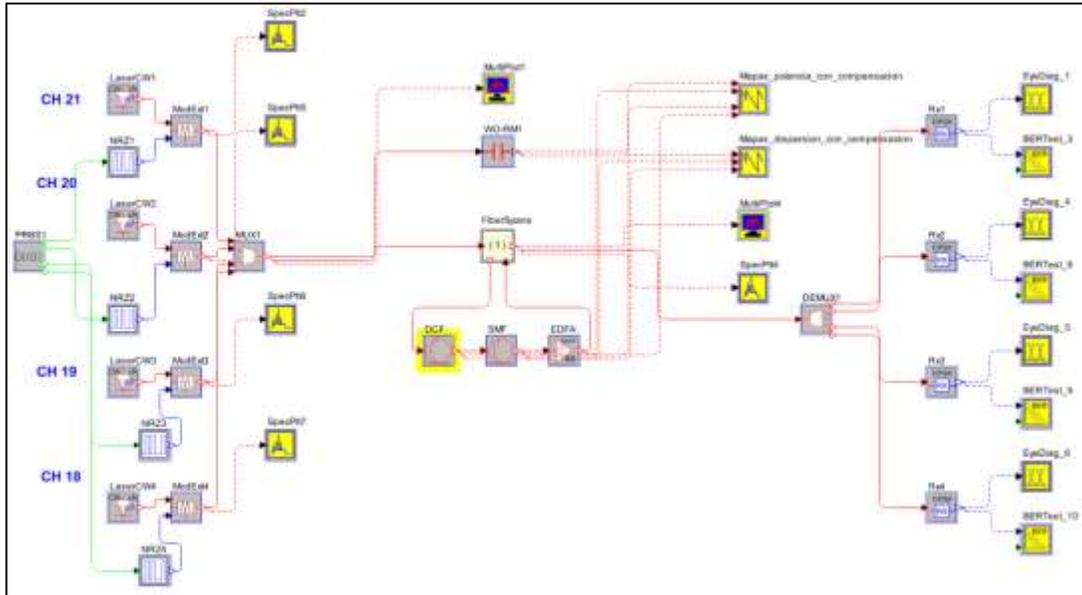


Figura 3.67. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.

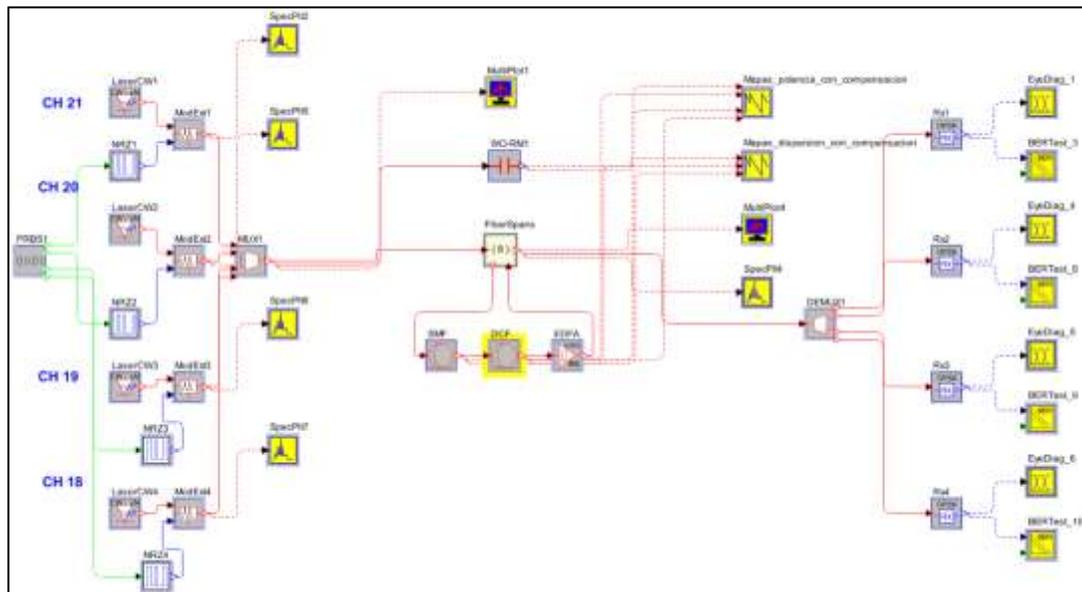


Figura 3.68. Técnica de post-compensación óptica para la CD cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.

La figura 3.69 muestra la constitución del receptor de las figuras 3.67 y 3.68, este receptor está configurado como súper bloque en OptSim.

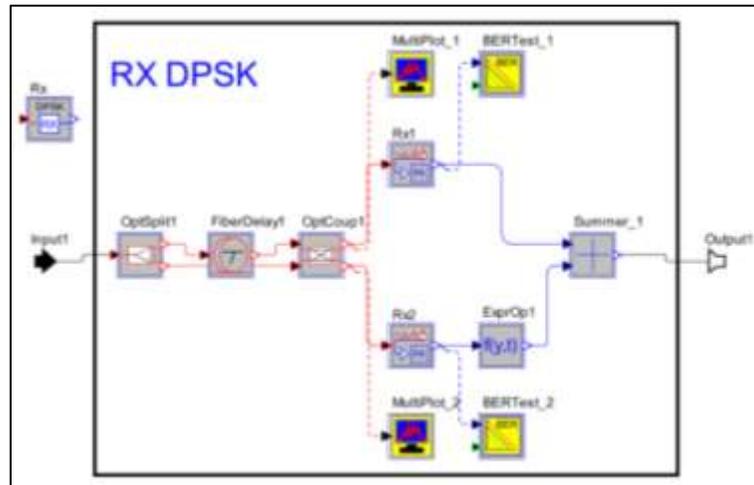


Figura 3.69. Súper bloque del receptor balanceado. Técnica de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK.

Para el análisis de esta sección inicialmente se procede a cubrir la longitud total del enlace (500 km). Se establece una longitud de SMF-28 acorde al rango impuesto por la sección 3.1.2 con el formato de modulación NRZ-DPSK a una potencia mínima de 1 mw, tabla 3.2. La longitud del span está definida por 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF, para un total de 97 km. Las tablas 3.14, 3.15 y las figuras 3.70, 3.71, 3.72, 3.73, 3.74, y 3.75 muestran las medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para alcanzar la longitud total del enlace de 500 km en las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. El canal analizado es el 18.

Número de Spans	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	OSNR (dB)
1	3.0145e-086	2.5866e+001	1.710035e+001
2	1.1697e-043	2.2801e+001	1.542295e+001
3	6.5757e-027	2.0568e+001	1.420497e+001
4	1.3551e-019	1.9065e+001	1.325250e+001
5	1.0761e-015	1.7988e+001	1.247080e+001
6	1.7310e-012	1.6849e+001	1.180779e+001
7	8.3733e-011	1.6108e+001	1.123128e+001
8	3.8615e-009	1.5230e+001	1.072022e+001
9	5.1039e-008	1.4523e+001	1.026137e+001

Tabla 3.14. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK.

Número de Spans	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	OSNR (dB)
1	2.2659e-083	2.5715e+001	1.706190e+001
2	3.3086e-043	2.2754e+001	1.538914e+001
3	9.8423e-027	2.0538e+001	1.416641e+001
4	1.3763e-019	1.9064e+001	1.320630e+001
5	9.8293e-016	1.8000e+001	1.241525e+001
6	1.1793e-012	1.6849e+001	1.174212e+001
7	6.7107e-011	1.6154e+001	1.115688e+001
8	2.6037e-009	1.5329e+001	1.064081e+001
9	3.6521e-008	1.4621e+001	1.017929e+001

Tabla 3.15. Medidas de BER estimada y factor Q estimado del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK.

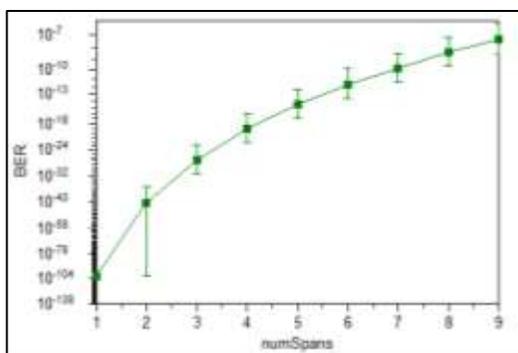


Figura 3.70. BER estimada vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

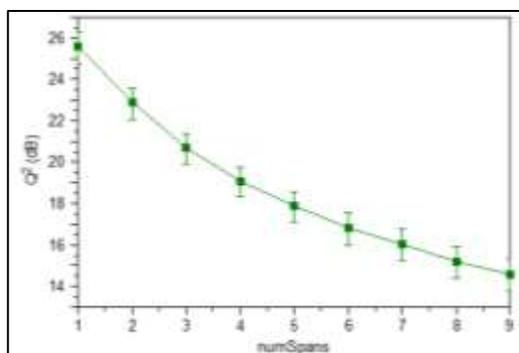


Figura 3.71. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

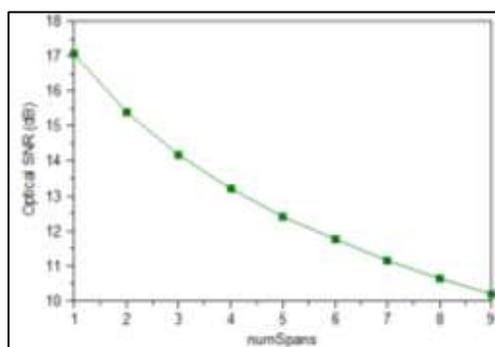


Figura 3.72. OSNR vs Número de spans. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

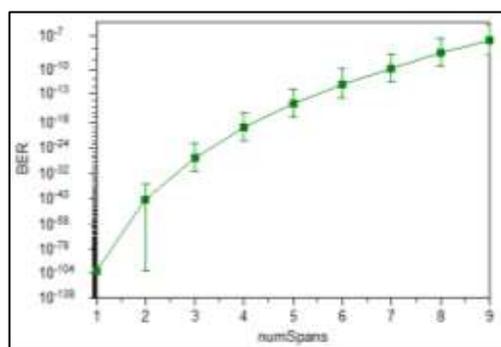


Figura 3.73. BER estimada vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

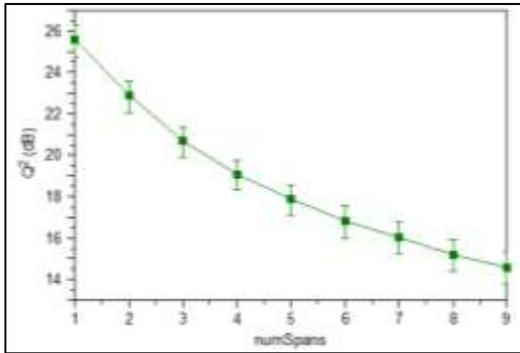


Figura 3.74. Factor Q estimado vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

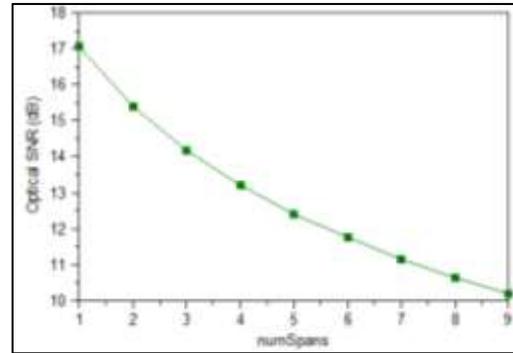


Figura 3.75. OSNR vs Número de spans. Técnica de post-compensación óptica para la CD con cuatro canales, número de spans variable y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

Las tablas 3.14, 3.15 y las figuras 3.70, 3.71, 3.72, 3.73, 3.74, y 3.75, muestran como el incremento del número de spans deterioran el desempeño del sistema. El deterioro es originado por el aumento de la longitud del enlace, la atenuación introducida por la SMF-28 y DCF, y el ruido adicionado por el aumento del número de EDFAs. A través de este análisis se determina que el máximo número de spans cumpliendo con parámetros de desempeño mínimos y sin necesidad de utilizar un regenerador óptico es de 8 correspondientes a 640 km de SMF-28. La longitud total del enlace de 500 km se alcanza y sobrepasa.

Las tablas 3.16 y 3.17, muestran las medidas de BER estimada y Factor Q estimado de cada uno de los canales implementados en las técnicas de pre y post compensación ópticas para la CD con cuatro canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK. Se observa que las variaciones de BER estimada y factor Q estimado, no son tan significativas de un canal a otro, esto se debe a la elección de canales consecutivos y al espaciamiento entre ellos.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)
18	7.5564e-009	15.05
19	1.3261e-009	15.49
20	1.3635e-009	15.48
21	2.2205e-010	15.90

Tabla 3.16. BER estimada y factor Q estimado para 8 spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)
18	4.4749e-009	15.193
19	1.5292e-009	15.459
20	1.0374e-009	15.551
21	1.8668e-010	15.938

Tabla 3.17. BER estimada y factor Q estimado para 8 spans necesarios para cubrir la longitud del enlace. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada Span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF.

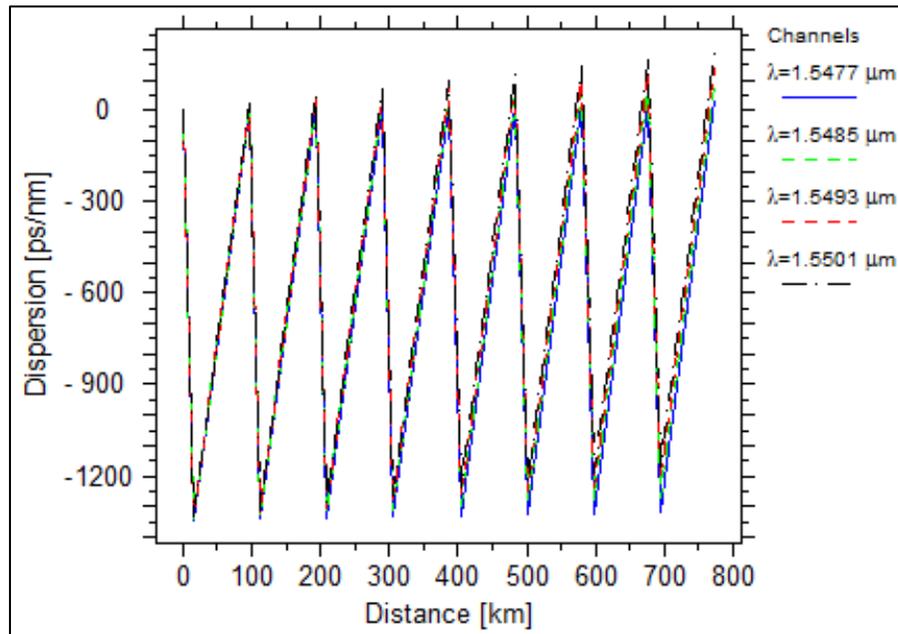


Figura 3.76. Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.

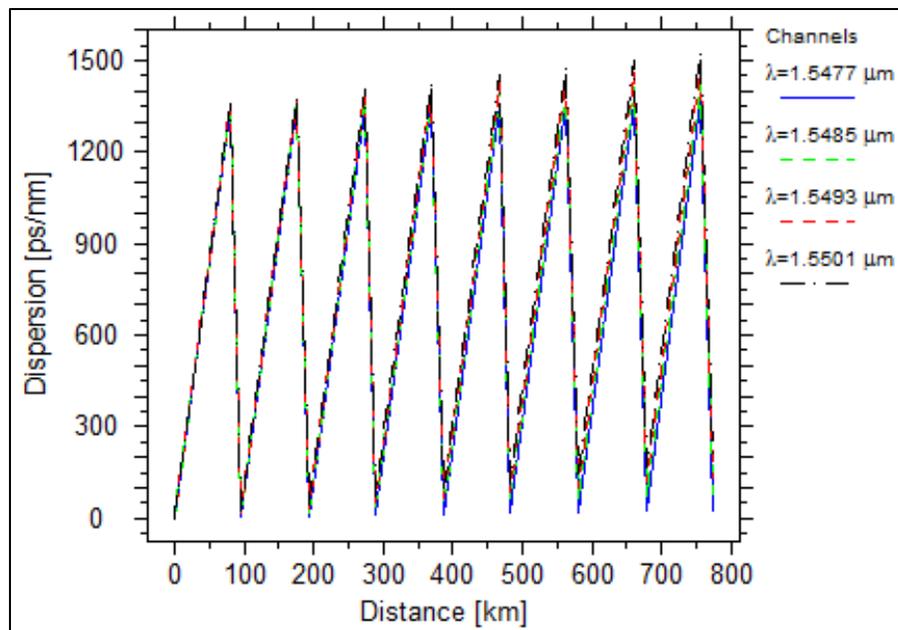


Figura 3.77. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.

Se procede a realizar un acercamiento de las figuras 3.76 y 3.77, para poder determinar la dispersión residual de un span (primer span), fig. 3.78 y fig.3.80, y la dispersión residual acumulada al final del enlace, fig. 3.79 y fig. 81, con el fin de destacar la dependencia de la CD con respecto al número de canales.

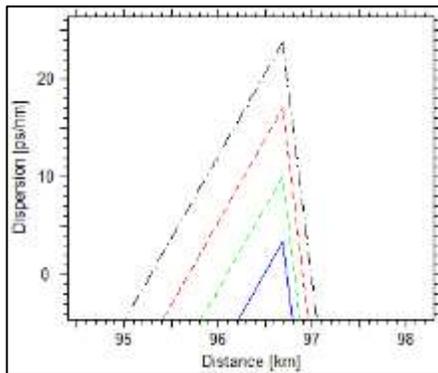


Figura 3.78. Dispersión residual del primer span para la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ- DPSK.

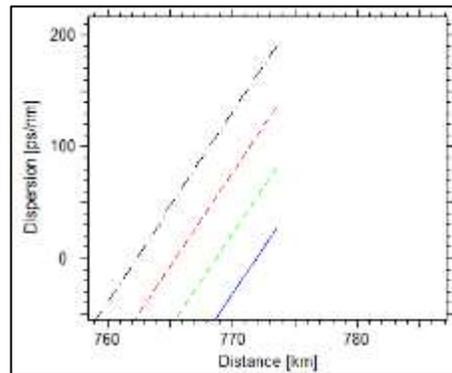


Figura 3.79. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ- DPSK.

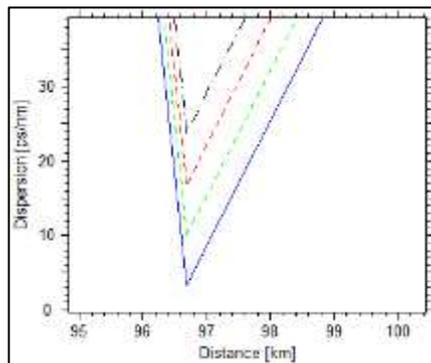


Figura 3.80. Dispersión residual del primer span para la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.

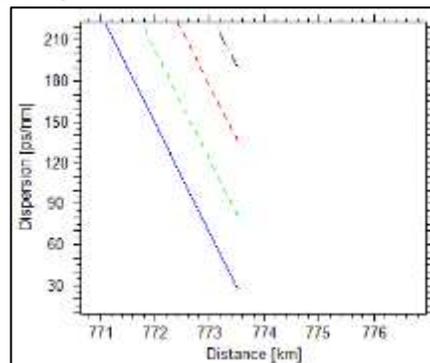


Figura 3.81. Dispersión residual acumulada al final del enlace de la técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK.

De las figuras 3.76 y 3.77 es notorio que cada canal cuenta con una dispersión residual por span distinta, figs. 3.78, 3.79, 3.80 y 3.81, debido a la relación proporcional de la CD con la longitud de onda seleccionada por cada canal, tablas 3.18 y 3.19.

Canal	Dispersión residual (ps/nm)							
	Span 1	Span 2	Span 3	Span 4	Span 5	Span 6	Span 7	Span 8
18	3.2	6.6	10	13	16	19.7	23	26
19	10	19.8	30	40	50	60	70	80
20	16.9	33.8	50.8	67.3	84	101	118	135
21	23.7	47.42	71.4	95	118	142	166	189

Tabla 3.18. Dispersión residual por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-DPSK.

Canal	Dispersión residual (ps/nm)							
	Span 1	Span 2	Span 3	Span 4	Span 5	Span 6	Span 7	Span 8
18	3.2	6	10	14	17	20	23	26
19	10	20	30	40	50	61	70	80
20	17	34	51	67	85	104	119	136
21	23	47	71	95	119	142	166	190

Tabla 3.19. Dispersión acumulada por span (ps/nm) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación óptica para la CD con 4 canales y formato de modulación NRZ-DPSK.

La dispersión residual acumulada al final del enlace para los canales 18, 19, 20 y 21 para las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, con cuatro canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK hace referencia a la columna span 8 de las tablas 3.18 y 3.19. Las figuras 1 de los anexos P y Q muestra el diagrama del ojo de los canales 18 y 21 para las técnicas de pre y post compensación óptica para la CD, con cuatro canales, 8 spans y formato de modulación NRZ-DPSK respectivamente. En estos diagramas de ojo no se observan significativas variaciones de un canal al otro.

### 3.3 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ELECTRÓNICAS PARA LA CD.

El escenario de simulación con las técnicas de compensación electrónicas para la CD, se clasifica en esta sección de la siguiente manera:

- Configuración 4: Escenario de simulación con técnica de pre-compensación electrónica para la CD.
- Configuración 5: Escenario de simulación con técnica de post-compensación electrónica para la CD.

La figura 3.82 muestra la configuración 4 del escenario de simulación con la técnica de pre-compensación óptica para la CD, en la cual se aplican EDC1, EDC2, EDC3 y EDC4. La figura 3.83 muestra la configuración 5 del escenario de simulación con la técnica de post-compensación óptica para la CD, en la cual se aplica EDC5, EDC6, EDC7 Y EDC8. Nótese que las técnicas de compensación electrónicas para la CD se aplican a cada uno de los canales a multiplexar y de-multiplexar.

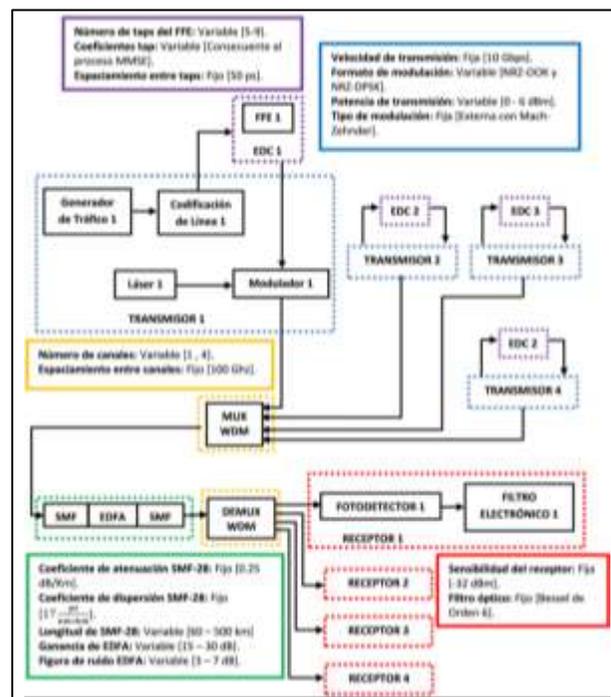


Figura 3.82. Configuración 4: escenario de simulación con la técnica de pre-compensación electrónica para la CD.

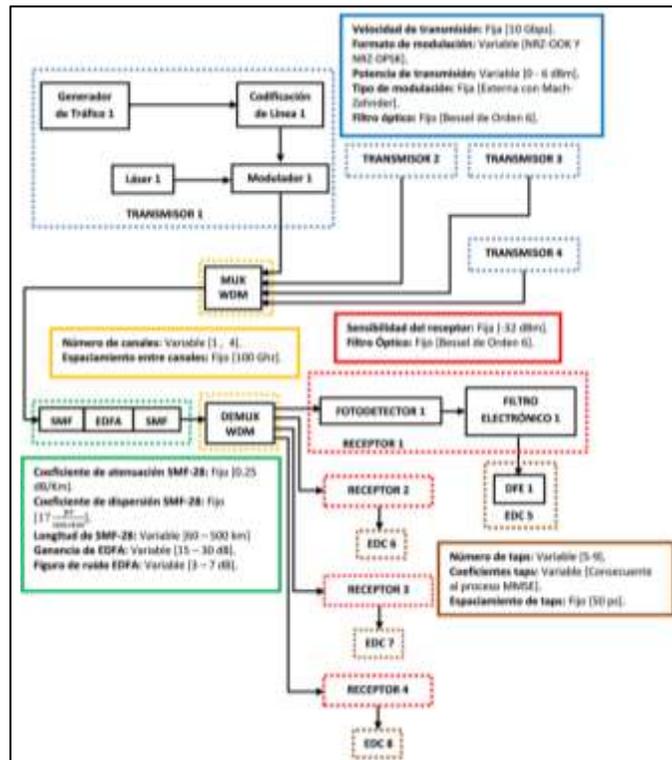


Figura 3.83. Configuración 5: escenario de simulación con la técnica de post-compensación electrónica para la CD.

El desarrollo de esta sección es abordado mediante el numeral 3 del plan de evaluación y pruebas, sección 2.4, concerniente a analizar el comportamiento del escenario de simulación con las técnicas de compensación electrónicas para la CD, con el fin de determinar la influencia de dichas técnicas al presentar variaciones de la potencia de transmisión, longitud de SMF-28, número de taps, coeficientes tap y número de canales; en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. Este análisis se lleva a cabo, teniendo en cuenta los parámetros mínimos de desempeño de operadores WDM comerciales definidos en la sección 2.4. En este orden de ideas, se presenta una serie de numerales que permiten dar cumplimiento al objetivo de esta sección:

**3.3.1** Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

**3.3.2** Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

**3.3.3** Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK.

**3.3.4** Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.

### 3.3.5 Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.

La técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada o de dos etapas FFE-NL y DFE, se fundamenta como uno de los principales aportes del trabajo de grado, al existir una escasa documentación concerniente a su análisis en redes WDM con técnicas de compensación electrónica para la CD.

Como ya se mencionó y clasificando cada uno de los numerales de esta sección, el objetivo de los mismos es analizar el desempeño de las técnicas de compensación electrónicas para la CD, bajo la influencia de variaciones de la potencia de transmisión, longitud de SMF-28, número de taps, coeficientes tap (numerales 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.4), y número de canales (numerales 3.3.3 y 3.3.5).

A continuación se detallan los rangos e incrementos de los parámetros establecidos en las simulaciones:

- La potencia de transmisión en un rango de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw.
- Potencia de lanzamiento en un rango de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB. Caso especial para el numeral 3.3.1.
- Longitud de SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km para las configuraciones con formato de modulación NRZ-OOK. Para las configuraciones con los formatos de modulación NRZ-DPSK se define la longitud de la SMF-28 en un rango de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. Los límites inferiores son establecidos en base a la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación, con los formatos de modulación NRZ-OOK (70 km) y NRZ-DPSK (80 km) a una potencia mínima de 1 mw, conforme a la sección 3.1. Los límites superiores se fundamentan en estudios concernientes a las técnicas de compensación electrónicas para la CD con formatos de modulación NRZ-OOK (120 km) y NRZ-DPSK (130 km), conforme a la sección 1.4.
- Número de taps en un rango de 5 a 9 con incrementos de 1 tap. El rango definido se fundamenta en estudios concernientes a las técnicas de compensación electrónicas para la CD, sección 1.4.
- Los ecualizadores son optimizados usando el criterio MMSE, para lo cual OptSim genera sus correspondientes coeficientes tap para un número de taps determinado.

El canal implementado en las configuraciones mono canal hace referencia al canal 18 (1547.72 nm). En las configuraciones de cuatro canales son implementadas las longitudes de onda 1547.72 nm (ch:18), 1548.52 nm (ch:19), 1549.32 nm (ch:20) y 1550.12 nm (ch:21); estos valores van acordes a la tabla 1.8. La potencia de

transmisión y longitud de SMF-28 de los numerales 3.3.3 y 3.3.5, se definen en base al análisis de los numerales 3.3.2 y 3.3.4. El numeral 3.1.1 recibe un análisis especial, especificado a continuación.

### 3.3.1 Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

La figura 3.84 muestra la configuración 4 del escenario de simulación, correspondiente a la técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

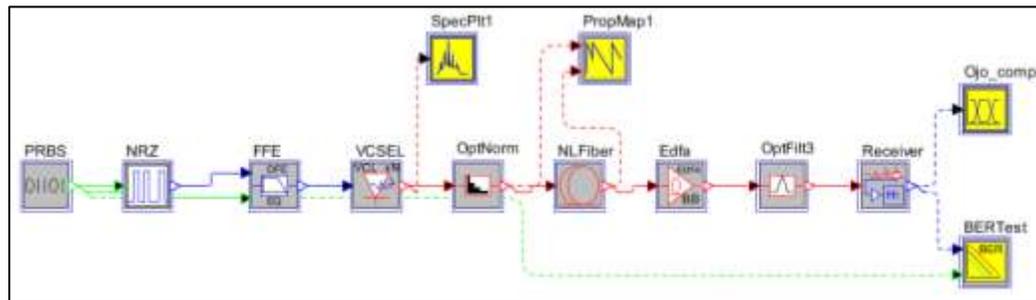


Figura 3.84. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en optSim.

Al realizar la implementación de la técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, se encuentra que los ecualizadores que entrega OptSim para implementarlos en el lugar del transmisor se deben colocar con láser tipo VCSEL modulado directamente, anexo R, lo cual cambia las características del modelo simplificado de red detalladas en la sección 1.5. Por otro lado el criterio MMSE no puede ser aplicado al ecualizador en el lugar del transmisor, ya que esta combinación no muestra resultados en simulación, según pruebas inicialmente realizadas, lo cual lleva necesariamente a encontrar los coeficientes tap de forma manual, siendo esta tarea bastante ardua y complicada para cada configuración específica de un número de taps, longitud de SMF-28 y potencia de lanzamiento<sup>28</sup> perteneciente al rango mencionado en la sección anterior. A pesar de los impedimentos detallados y después de realizar diferentes consultorías con el soporte de la herramienta de simulación, se determina conjuntamente un diseño de ecualización en el transmisor (técnica de pre-compensación electrónica para CD) con el formato de modulación NRZ-OOK donde se utiliza VCSEL, un ecualizador FFE no lineal con 27 taps y no se usa criterio MMSE. Debido al cambio del láser de CW a VCSEL, no se pueden utilizar los resultados de la sección 3.1.1, siendo necesario determinar la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de

<sup>28</sup> Se habla de potencia de lanzamiento, ya que el láser VCSEL depende de varios parámetros de configuración a diferencia del láser CW haciéndose necesaria una etapa de control de potencia.

CD con el formato de modulación NRZ-OOK con las condiciones del transmisor tratadas en este numeral, obteniendo los siguientes resultados:

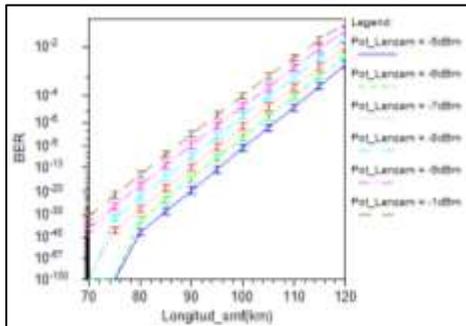


Figura 3.85. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Configuración con ausencia de técnica de pre-compensación electrónica para la CD y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB.

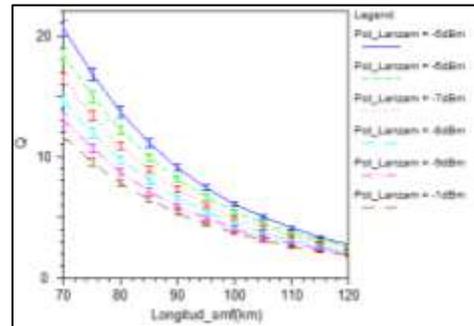


Figura 3.86. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Configuración con ausencia de técnica de pre-compensación electrónica para la CD y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB.

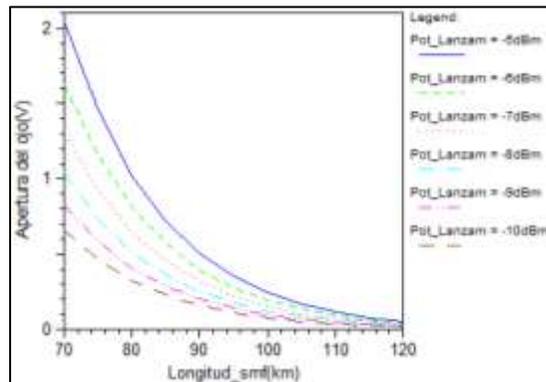


Figura 3.87. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Configuración con ausencia de técnica de pre-compensación electrónica para la CD y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB.

De las figuras 3.85, 3.86 y 3.87, es notorio que los parámetros de monitoreo mejoran a medida que aumenta la potencia de lanzamiento, encontrando que la distancia máxima alcanzada a una mínima potencia de lanzamiento de -10 dBm está alrededor de los 85 km, mientras que para una máxima potencia de -5 dBm está alrededor de los 100 km. Téngase en cuenta que la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación, con formato de modulación NRZ-OOK se determina bajo parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales, sección 2.4.

Las figuras 3.88, 3.89 y 3.90 muestran la BER estimado, factor Q estimado y apertura del ojo de la técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un equalizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

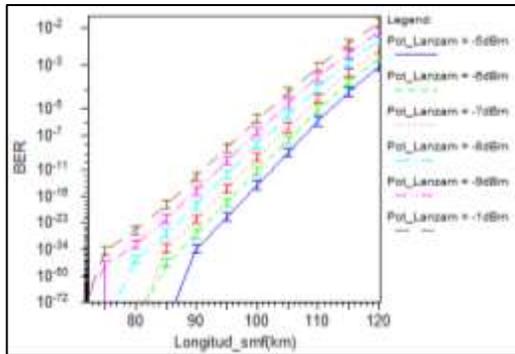


Figura 3.88. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB.

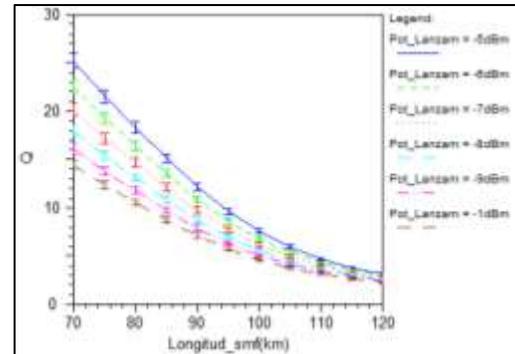


Figura 3.89. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB.

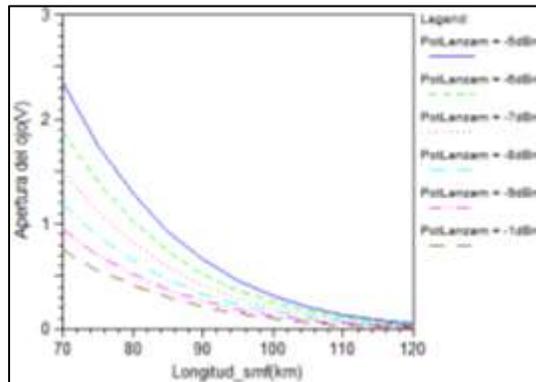


Figura 3.90. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Longitud SMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km. Potencia de lanzamiento de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dB.

De las gráficas 3.88, 3.89 y 3.90, se observan las mejoras que introduce la técnica de pre-compensación electrónica para la CD implementada con un ecualizador FFE-NL en el lugar del transmisor. Por otro lado, es evidente la disminución de la BER, el incremento del factor Q y la apertura del ojo a medida que se aumenta la potencia de lanzamiento, destacando la dependencia de la técnica frente a esta. De igual manera se destaca que el valor de distancia compensada está alrededor de los 110km (aproximadamente 1850 ps/nm) en el escenario de simulación. Los diagramas de ojo, fig. 3.91, corroboran la mejoría en la apertura del ojo y en los umbrales de decisión de esta técnica de compensación.

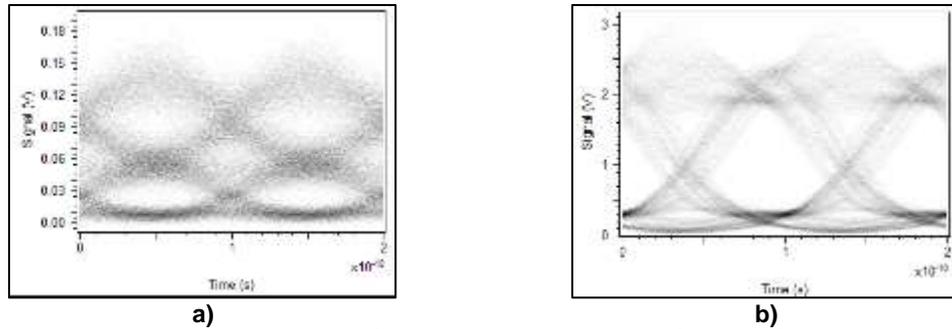


Figura 3.91. Diagramas del ojo de la técnica de pre-compensación electrónica para la CD mono canal y con formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC utilizando una ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Potencia de lanzamiento de -7dbm y longitud de SMF-28 de 100km.

Basados en la sección 1.4 referente a las técnicas de compensación electrónica para la CD y en el análisis de esta sección, se espera que la técnica de post-compensación electrónica presente mejores prestaciones que la técnica de pre-compensación electrónica, al utilizar ecualizadores DFE que permiten corregir la ISI pre-cursor y post-cursor, a diferencia del FFE-NL que corrige únicamente la ISI pre-cursor.

### 3.3.2 Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

Las figuras 3.92, 3.93 y 3.94 muestran respectivamente la configuración 5, correspondiente a la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato NRZ-OOK, implementadas en OptSim.

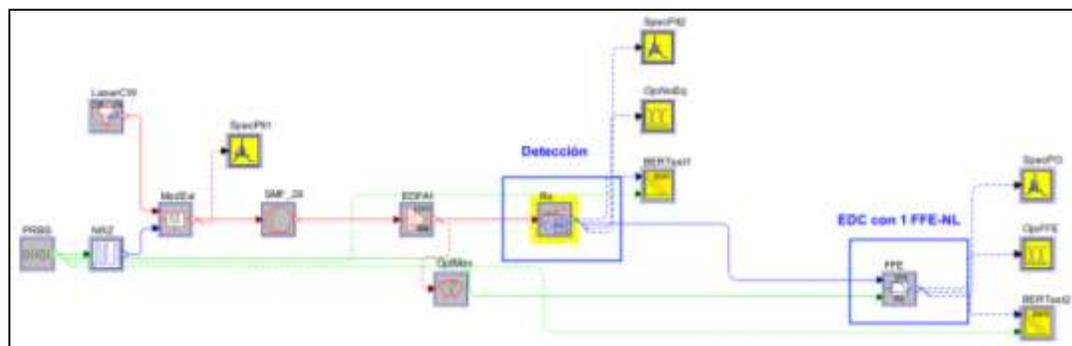


Figura 3.92. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

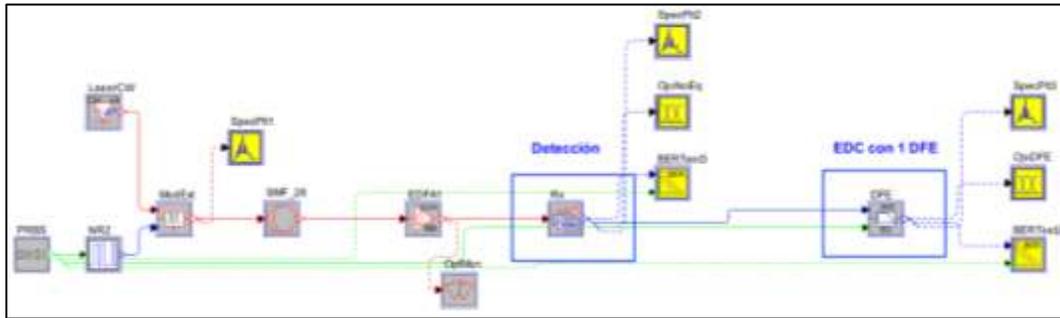


Figura 3.93. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

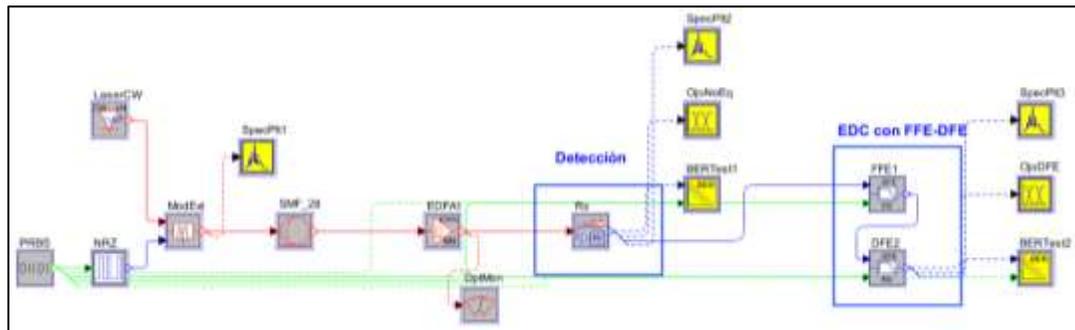


Figura 3.94. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

Las tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 de los anexos T, U y V; muestran respectivamente las medidas de BER estimado, Factor Q estimado, Apertura del ojo y OSNR de la configuración 5 con un ecualizador FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, mono canal y formato NRZ-OOK. Cabe resaltar que la configuración del número de taps debe ser correctamente ajustado, ya que si no existe una configuración adecuada, OptSim no muestra sus correspondientes resultados.

Fundamentado en las tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 de los anexos T, U, V; se realiza un resumen de máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw, para un número mínimo de taps necesarios en un ecualizador FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE, tablas 3.20, 3.21 y 3.22, que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales, sección 2.4.

Ptx (mw)	Número de taps	Distancia (km)	BER	Dispersión Acumulada (ps/nm)	Q (dB)	Apertura del ojo (v)	OSNR (dB)
1	5	115	3.7797e-010	1936	6.1539	7.0329e-004	17.76
2	7	120	3.4885e-011	2021	6.5212	1.4743e-003	19.02
3	8	120	3.2875e-016	2021	8.0782	2.2770e-003	20.13
4	8	120	3.6744e-021	2021	9.3686	3.0689e-003	20.81

Tabla 3.20. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios en un ecualizador FFE-NL que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

Ptx (mw)	Número de taps	Distancia (km)	BER	Dispersión Acumulada (ps/nm)	Q (dB)	Apertura del ojo (v)	OSNR (dB)
1	6	120	4.8276e-009	2021	5.7367	7.1283e-004	16.78
2	6	120	3.0453e-014	2021	7.5061	1.4638e-003	19.02
3	6	120	3.3291e-019	2021	8.8805	2.2197e-003	20.13
4	6	120	3.3280e-024	2021	10.082	2.9821e-003	20.81

Tabla 3.21. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios en un ecualizador DFE que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

Ptx (mw)	Número de taps	Distancia (km)	BER	Dispersión Acumulada (ps/nm)	Q (dB)	Apertura del ojo (v)	OSNR (dB)
1	7	115	2.0741e-013	1936	17.20	8.1879e-004	17.7
2	9	120	1.2047e-014	2021	17.64	1.6800e-003	19.02
3	9	120	6.8308e-020	2021	19.13	2.5804e-003	20.9
4	9	120	2.8674e-025	2021	20.27	3.4794e-003	20.91

Tabla 3.22. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios en un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

De los anexos T, U y V con sus respectivas tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, y las tablas 3.20, 3.21 y 3.22, correspondientes a la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor con formato de modulación NRZ-OOK, se puede apreciar una alta dependencia en el desempeño de los ecualizadores frente a la potencia y al número de taps, en una relación no lineal, para lo cual no siempre un número mayor de taps a altas potencias presenta los mejores beneficios un ecualizador. Por lo tanto, para una potencia determinada, la BER puede mejorar a distancias menores a las calculadas con un mayor número de taps; uno de estos casos específicos puede verse en la tabla 7 del anexo S, donde el ecualizador FFE-NL para una potencia de transmisión de 4mw y una longitud de SMF-28 de 115 km, presenta una BER de 1.0907e-036 en comparación a una BER de 3.6744e-021 lograda con 8 taps para una longitud de 120 km de SMF-28. Cabe resaltar que el número de taps del

ecualizador, muestra una dependencia directa a la complejidad computacional<sup>29</sup> tanto de software como de hardware, por consiguiente, el arreglo simple de 8 taps en el ecualizador FFE-NL muestra buenas prestaciones al incrementar la distancia de transmisión sin aumentar excesivamente la BER, en comparación al de 9 taps. Por otro lado, las tablas 1, 3, 5 y 7 del anexo T concernientes al ecualizador DFE, es notorio que una variación de longitud en algunos casos mayor a 5 km de SMF-28 puede llevar a que el sistema no cumpla con los parámetros mínimos de desempeño establecidos por los operadores WDM comerciales, siendo este ecualizador un elemento que se caracteriza por ser altamente sensible a variaciones de potencia, número de taps y en especial a la longitud de SMF-28, además, de no necesitar un excesivo número taps para cumplir con los parámetros mínimos de desempeño que se deseen establecer. En las tablas 1, 3, 5 y 7 del anexo U, relacionadas al ecualizador en cascada o de dos etapas FFE-NL y DFE, se observa que se presentan mejoras, en especial del factor Q, algo también visto en la tabla 3.22 para parámetros mínimos de desempeño; esto se debe a que se toman las características de ambos ecualizadores dedicando una etapa no lineal exclusiva a corregir la ISI precursor y otra etapa dedicada a corregir la ISI post-cursor de manera más eficiente.

Las figuras 3.95, 3.96, 3.97, 3.98, 3.99, 3.100, 3.101, 3.102 y 3.103 muestran respectivamente las medidas de BER estimado, Factor Q estimado, apertura del ojo y OSNR de la configuración 5 con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.

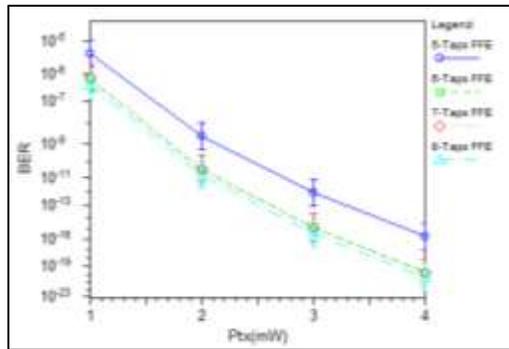


Figura 3.95. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps de 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud SMF-28 de 120 km.

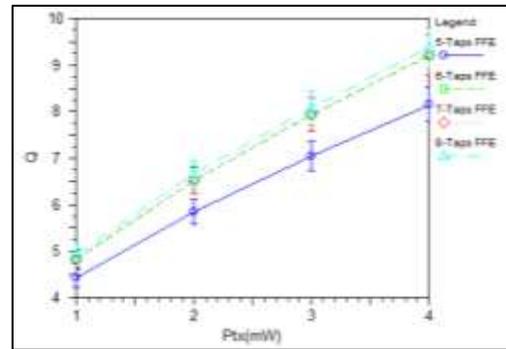


Figura 3.96. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps de 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud SMF-28 de 120 km.

<sup>29</sup> Haciendo a referencia a la capacidad y velocidad en hardware, y al diseño en software.

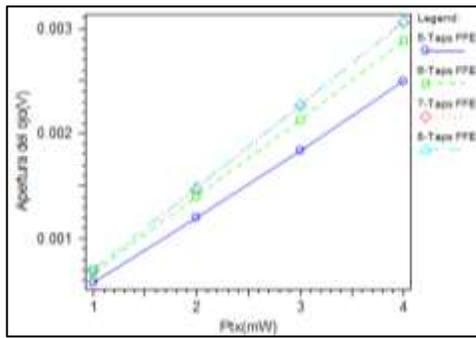


Figura 3.97. Apertura del ojo vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps de 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud SMF-28 de 120 km.

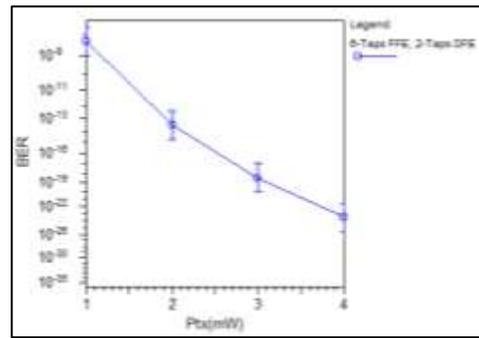


Figura 3.98. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.

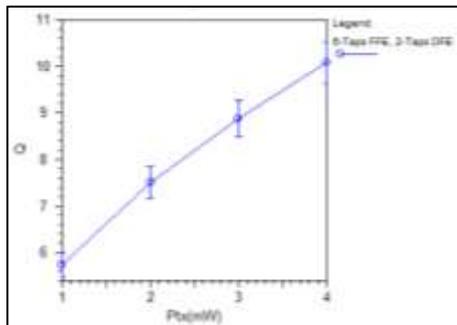


Figura 3.99. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.

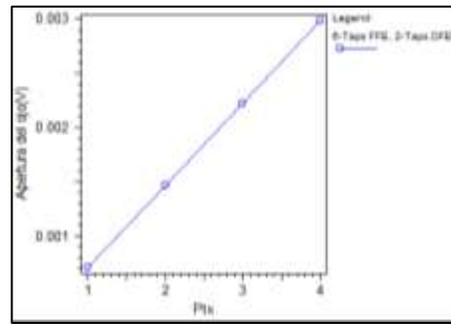


Figura 3.100. Apertura del ojo vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualización DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.

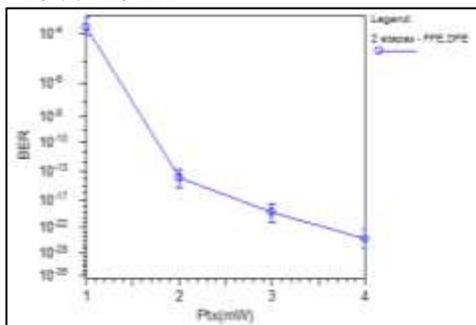


Figura 3.101. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 FFE-NL, 7 taps FFE y 2 taps DFE. Longitud de SMF-28 de 120 km.

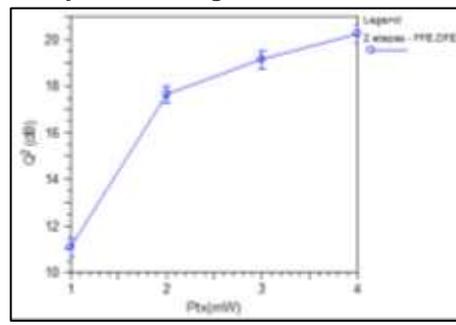


Figura 3.102. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 FFE-NL, 7 taps FFE y 2 taps DFE. Longitud de SMF-28 de 120 km.

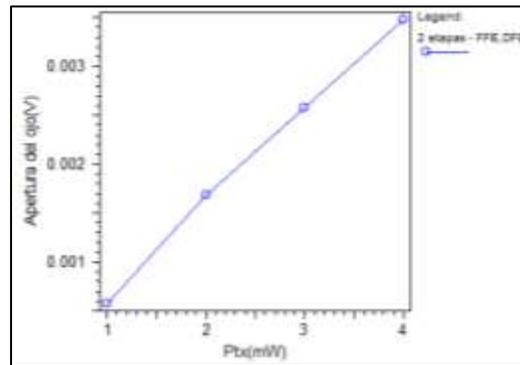


Figura 3.103. Apertura del ojo vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 FFE-NL, 7 taps FFE y 2 taps DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.

Las figuras 3.95, 3.96, 3.97, 3.98, 3.99, 3.100, 3.101 y 3.103, se destaca que una aumento en la potencia de transmisión, conlleva a significativas disminuciones en la BER, aumentos en el factor Q y la apertura del ojo, sin embargo, estos incrementos de potencia no pueden ser indiscriminados, debido a su alta relación con los efectos no lineales. Las figuras 3.95, 3.96 y 3.97 muestran que existen valores de potencia para los cuales un número variable de taps, presentan prestaciones con mínimas diferencias de desempeño, resaltando que existe un número de taps límite para lo cual el sistema muestra un desempeño aceptable. Las figura 3.102 destaca los altos valores de factor Q que se presentan en un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE, pero debe tenerse en cuenta que su diseño conlleva a una alta complejidad computacional, debido a que, es un ecualizador de 2 etapas que contiene 2 slicer (explicado detalladamente en la sección 1.5). Por otro lado, se observa que este ecualizador, presenta una altísima dependencia frente a la potencia de transmisión, en donde es notorio que al incrementar la potencia, la respuesta en los parámetros de desempeño es mejor, sin embargo la tendencia no es proporcional ya que las curvas de BER y Q no son lineales.

A continuación se procede a tomar de las tablas 3.20, 3.21 y 3.22 la condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia de transmisión de 1 mw, con el fin de observar las mejorías impuestas en el diagrama del ojo al realizar una comparación de los mismos sin y con EDC en cada uno de los ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE:

Tipo de Ecualizador	Número de Taps	Longitud de SMF-28 (km)
FFE-NL	5 en la sección FFE	115
DFE	6 en la sección FFE y 2 en la sección feedback	120
FFE-NL y DFE	7 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback	115

Tabla 3.23. Condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK.



Figura 3.104. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE. Longitud 115 km de SMF-28.



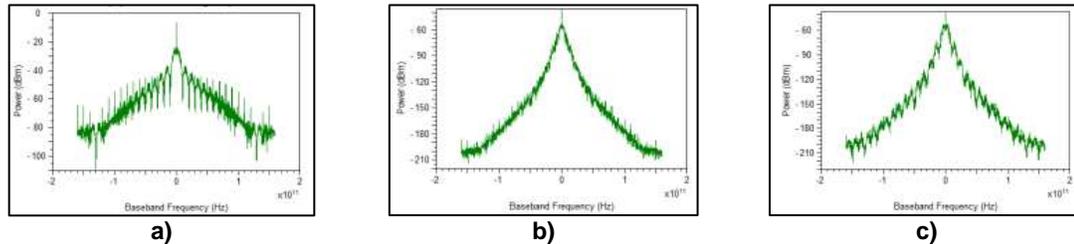
Figura 3.105. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 6 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 120 km de SMF-28.



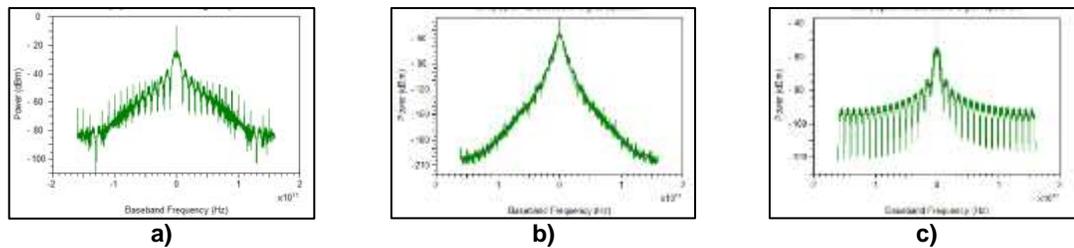
Figura 3.106. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 7 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 115 km de SMF-28.

De las figuras 3.104, 3.105 y 3.106, se observa que una de las mejores prestaciones que brindan las técnicas de ecualización electrónica para la CD en el desempeño del sistema, consta en aumentar la apertura del ojo y de esta manera optimizar los umbrales de decisión reduciendo la BER. La figura 3.105 resalta con la asimetría en la apertura del ojo; esto se debe a que la ISI pre-cursor y post-cursor no están corregidas de una forma satisfactoria, algo que se puede observar en la tabla 3.21 donde a pesar de compensar cerca de 2021 ps/nm a una potencia de transmisión de 1mw, se encuentra que el factor Q es de 5.7367 dB, un valor bajo respecto a los demás ecualizadores, implicando que se necesita más potencia para poder mejorar las prestaciones del ecualizador, tal como lo indican los parámetros de desempeño para potencias de 2, 3 y 4 mw.

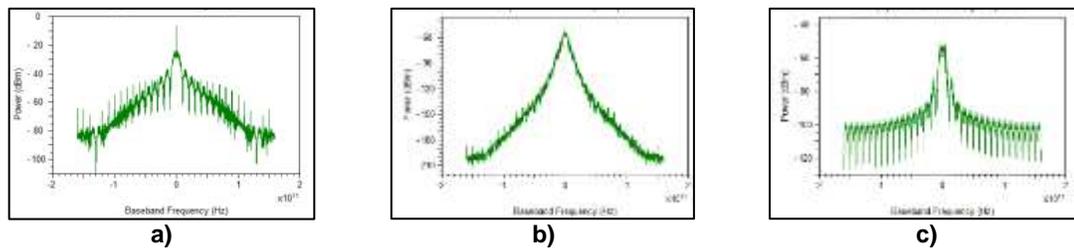
Las figuras 3.107, 3.108 y 3.109, muestran el espectro óptico en banda base después del modulador, sin y con EDC de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK para la condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia transmisión de 1 mw establecida en la tabla 3.23.



**Figura 3.107.** Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE. Longitud 115 km de SMF-28.



**Figura 3.108.** Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 6 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 120 km de SMF-28.



**Figura 3.109.** Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 7 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 115 km de SMF-28.

De las figuras 3.107, 3.108 y 3.109, se puede apreciar que la EDC busca recuperar las componentes espectrales en banda base más significativas, sin embargo, el FFE-NL no es tan eficiente al recuperar el espectro, como puede observarse en la figura 107 c).

De lo anteriormente dicho, en el desarrollo del presente numeral, cabe resaltar que los ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor presentan buenas prestaciones, sin embargo, el FFE-NL ataca únicamente la ISI pre-cursor (explicada detalladamente en la sección 1.5), presentándose como una limitante para su desempeño, caso opuesto al DFE que compensa la ISI pre y post cursor. El DFE a pesar de compensar la ISI pre y post cursor, presenta una asimetría en el diagrama del ojo que es corregida por el ecualizador en cascada FFE-NL y DFE.

### 3.3.3 Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK.

Las figuras 3.110, 3.111 y 3.112 muestran la configuración 5, correspondiente a la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, implementados en OptSim.

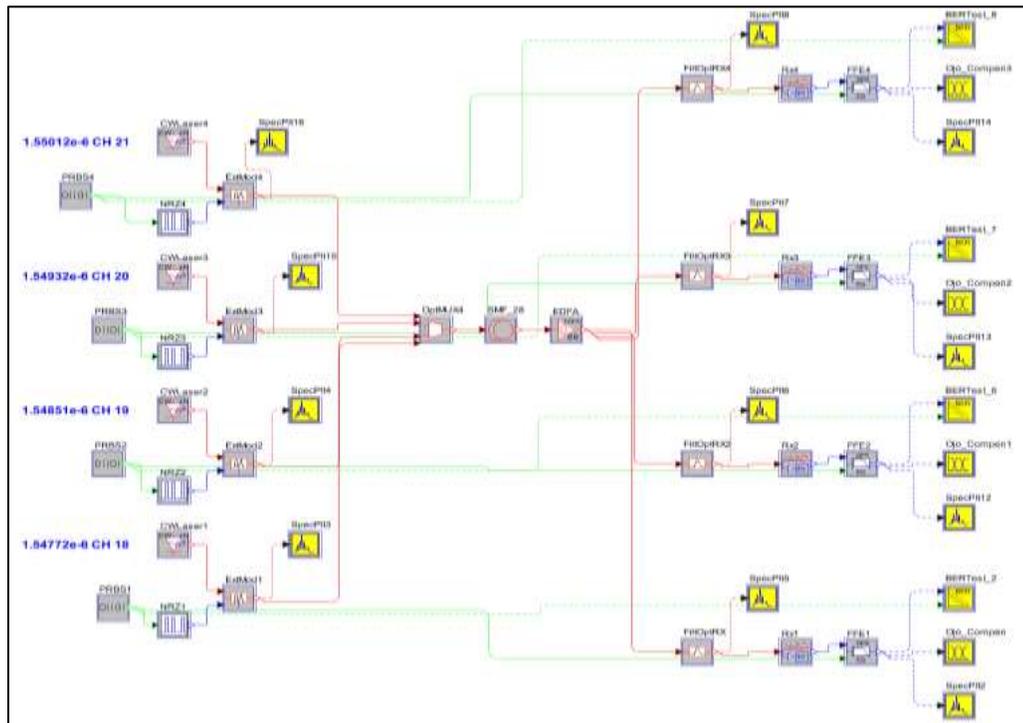


Figura 3.110. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

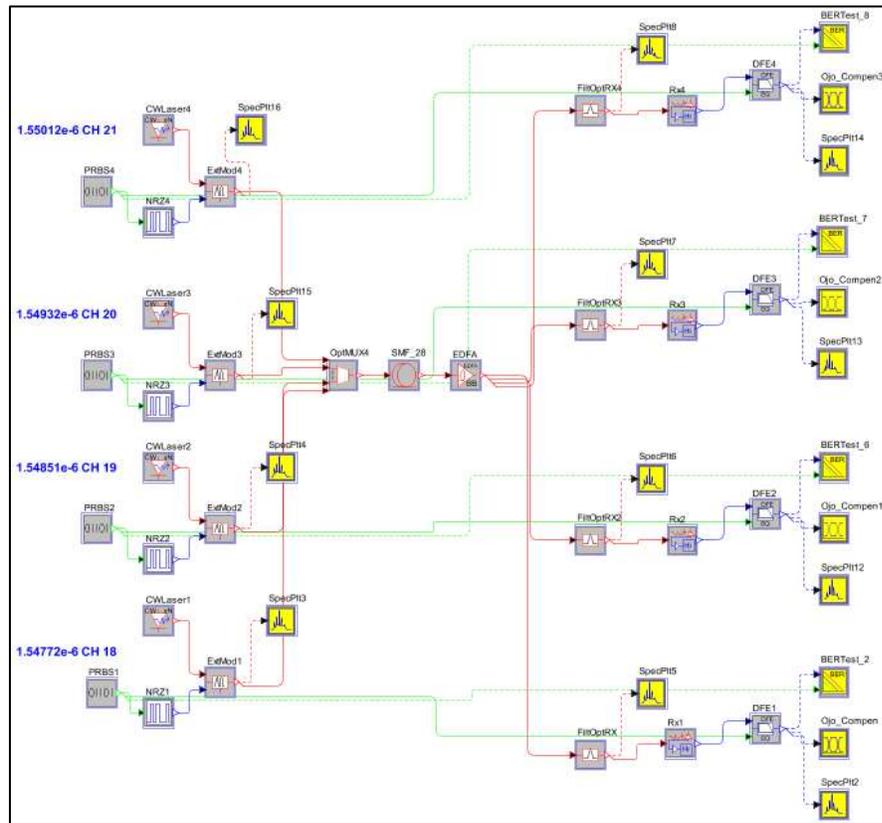


Figura 3.111. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un equalizador DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

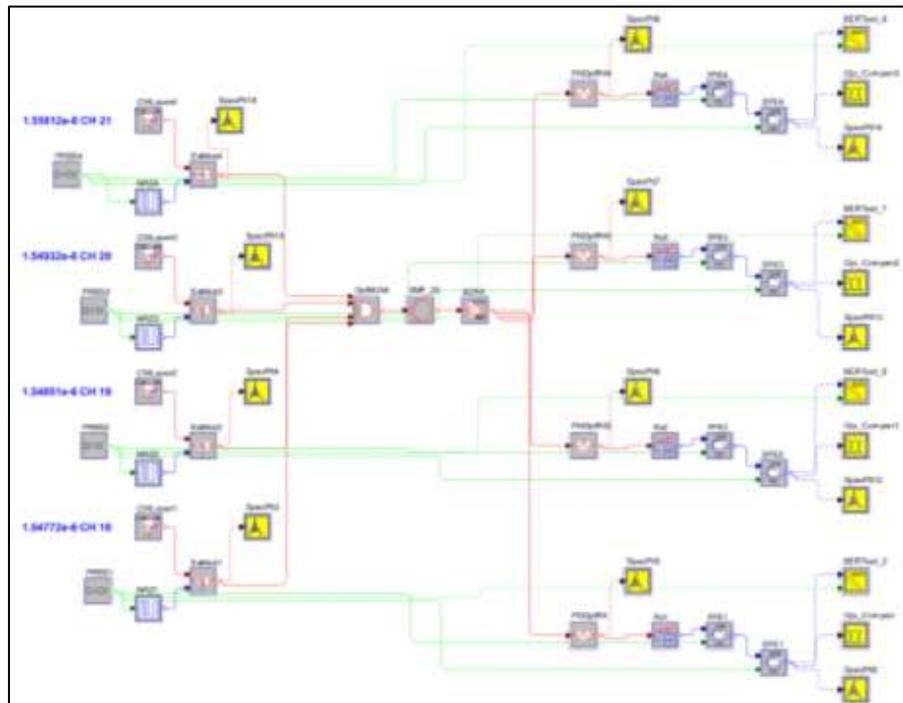


Figura 3.112. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un equalizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, implementada en OptSim.

Las figuras 3.113, 3.114 y 3.115 muestran respectivamente el mapa de dispersión de la configuración 5 con ecualizadores FFE-NL, DFE, y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK.

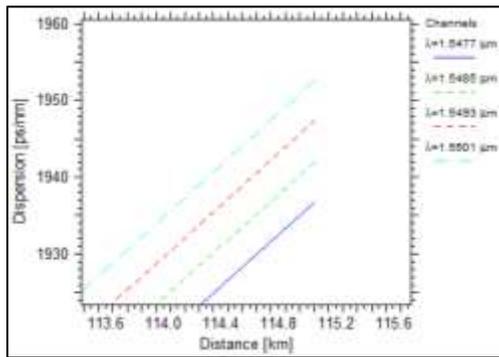


Figura 3.113. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK.

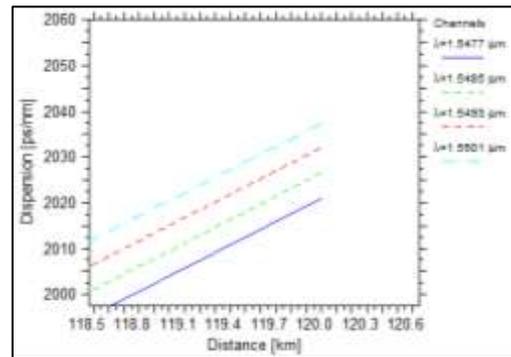


Figura 3.114. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK.

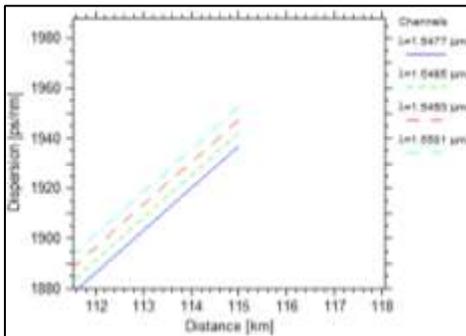


Figura 3.115. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-OOK.

A continuación se muestran las medidas de BER estimado, Factor Q estimado, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21, para la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, bajo la condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia transmisión de 1 mw especificada en la tabla 3.23.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Apertura del ojo (v)	Dispersión acumulada (dispersión compensada ps/nm)
18	2.9854e-009	5.817	5.4280e-004	1936
19	5.3994e-009	5.717	5.4042e-004	1942
20	9.6396e-009	5.618	5.3815e-004	1947
21	1.4033e-008	5.553	5.3785e-004	1952

Tabla 3.24. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK. Número de taps: 5 en la sección FFE. Longitud 115 km de SMF-28.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Apertura del ojo (v)	Dispersión acumulada (dispersión compensada ps/nm)
18	1.7071e-009	15.43	5.3236e-004	2020
19	1.9327e-009	15.40	5.3175e-004	2026
20	5.8615e-009	15.38	5.3082e-004	2031
21	1.0994e-009	15.33	5.3221e-004	2037

**Tabla 3.25. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK. Número de taps: 6 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 120 km de SMF-28.**

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Apertura del ojo (v)	Dispersión acumulada (dispersión compensada ps/nm)
18	4.3428e-012	6.826	5.9962e-004	1936
19	6.8288e-012	6.761	5.9813e-004	1942
20	1.1175e-011	6.689	5.9536e-004	1946
21	1.4354e-011	6.653	5.9256e-004	1952

**Tabla 3.26. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK. Número de taps: 7 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 115 km de SMF-28.**

De las tablas 3.24, 3.25 y 3.26 se observa que cada uno de los canales presenta dispersión acumulada (compensada) diferente entre ellos, por otro lado, es notorio que los canales presentan fluctuaciones en la BER y el factor Q, esto precisamente se debe a que cada canal descubre su propia dispersión y aunque la apertura del ojo se mantiene casi igual para cada ecualizador, se hace necesario que la ecualización se deba realizar a cada uno de los canales de forma única variando el número de taps según la cantidad de dispersión a compensar.

El anexo U muestran los diagramas de ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y, FFE-NL y DFE en cascada, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, bajo las condiciones especificadas en la tabla 3.23. En estos diagramas de ojo no se observan significativas variaciones de un canal al otro para cada ecualizador.

### **3.3.4 Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.**

Las figuras 3.116, 3.117 y 3.118 muestran respectivamente la configuración 5, correspondiente a la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato NRZ-DPSK, implementadas en OptSim.

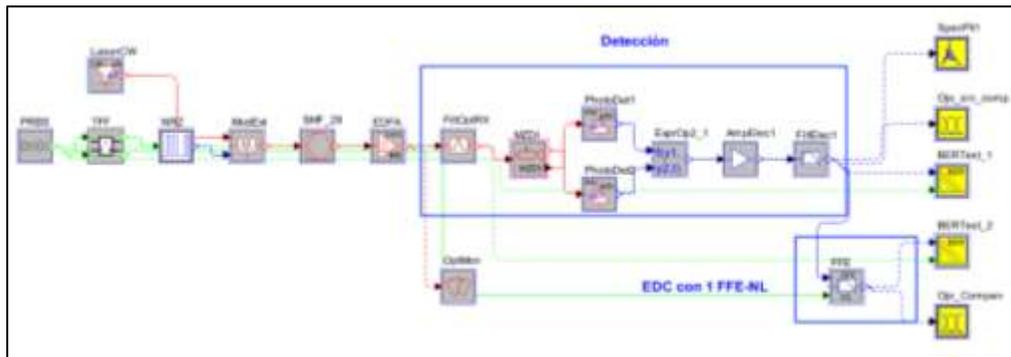


Figura 3.116. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, implementado en OptSim.

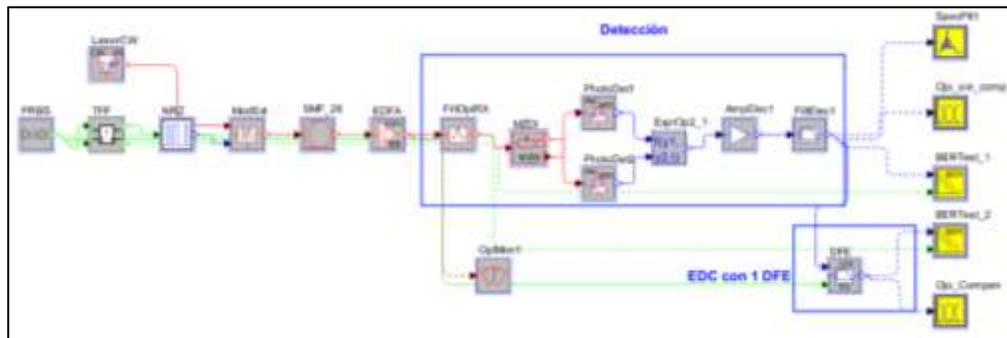


Figura 3.117. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, implementado en OptSim.

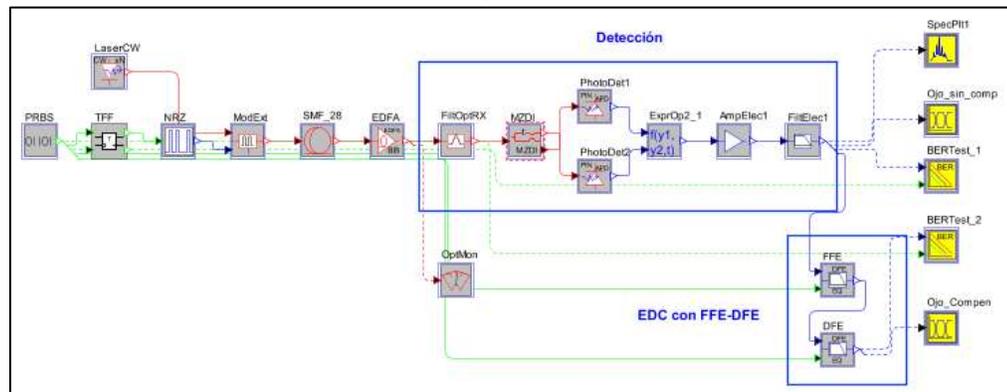


Figura 3.118. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, implementado en OptSim.

Los anexos W, X, Y y sus correspondientes tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8; muestran respectivamente las medidas de BER estimado, Factor Q estimado, Apertura del ojo y OSNR de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato NRZ-DPSK. El número de taps, debe ser correctamente ajustado, ya que si no existe una configuración adecuada, OptSim no muestra sus correspondientes resultados.

Fundamentado en los anexos W, X, Y y sus correspondientes las tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8; se realiza un resumen de la máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw, para el número mínimo de taps necesarios en un ecualizador FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE, tablas 3.27, 3.28 y 3.29, que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales, sección 2.4.

Ptx (mw)	Número de taps	Distancia (km)	BER	Dispersión Acumulada (ps/nm)	Q (dB)	Apertura del ojo (v)	OSNR (dB)
1	8	130	2.5746e-009	2189	15.33	6.1826e-004	15.62
2	7	130	6.1421e-009	2189	15.11	1.1699e-003	16.97
3	7	130	5.2595e-009	2189	15.15	1.7985e-003	17.51
4	7	130	2.9211e-009	2189	15.30	2.4238e-003	17.80

**Tabla 3.27. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.**

Ptx (mw)	Número de taps	Distancia (km)	BER	Dispersión Acumulada (ps/nm)	Q (dB)	Apertura del ojo (v)	OSNR (dB)
1	5	130	1.8792e-009	2189	15.40	6.0407e-004	15.62
2	5	130	1.1448e-009	2189	15.52	1.2173e-003	16.97
3	5	130	7.0192e-010	2189	15.64	1.8375e-003	17.51
4	5	130	4.3081e-010	2189	15.75	2.4646e-003	17.80

**Tabla 3.28. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.**

Ptx (mw)	Número de taps	Distancia (km)	BER	Dispersión Acumulada (ps/nm)	Q (dB)	Apertura del ojo (v)	OSNR (dB)
1	5	130	4.6431e-010	2189	15.73	5.7894e-004	15.60
2	5	130	2.6102e-010	2189	15.86	1.1657e-003	16.97
3	5	130	1.4963e-010	2189	15.98	1.7605e-003	17.55
4	5	130	8.6685e-011	2189	16.10	2.3636e-003	17.91

**Tabla 3.29. Máxima longitud de SMF-28 alcanzada con potencias de transmisión de 1, 2, 3 y 4 mw para un número mínimo de taps necesarios que permita obtener parámetros mínimos de desempeño establecidos por operadores WDM comerciales. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.**

De los anexos W, X, Y y las tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, y las tablas 3.27, 3.28 y 3.29, correspondientes a la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor con formato de modulación NRZ-DPSK, se puede apreciar una alta dependencia en la apertura del ojo frente a los cambios de potencia considerando una mínima variación del número de taps. Para el caso en cuestión, la combinación de la ecualización con el formato NRZ-DPSK ofrece una compensación alrededor de los 2189 ps/nm con parámetros de monitoreo mínimos, esto conlleva a que si se disminuye la distancia al contexto analizado en el formato de modulación NRZ-OOK

con post-compensación electrónica, es muy probable que se obtengan resultados muy similares al disminuir la distancia de la SMF-28.

Las figuras 3.119, 3.120, 3.121, 3.122, 3.123, 3.124, 3.125, 3.126 y 3.127 muestran respectivamente las medidas de BER estimado, Factor Q estimado, apertura del ojo y OSNR de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con equalizadores FFE-NL, DFE y, FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK.

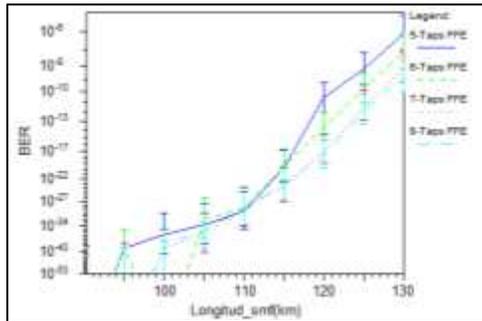


Figura 3.119. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Número de taps: 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

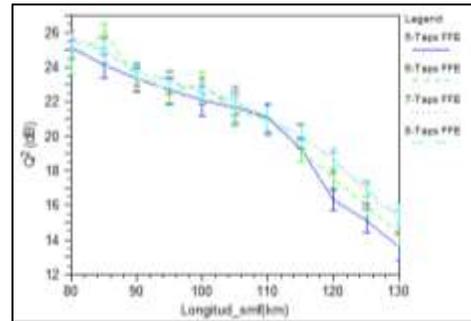


Figura 3.120. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Número de taps: 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

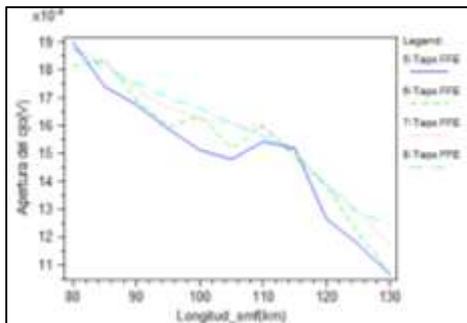


Figura 3.121. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 mw. Número de taps: 5 a 8 con incrementos de 1 tap. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

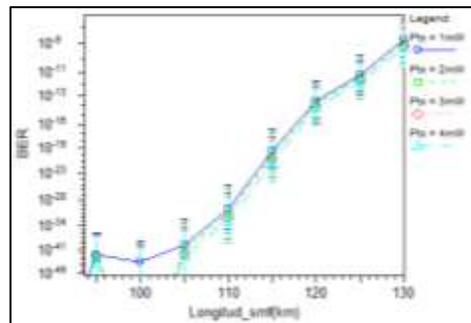


Figura 3.122. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

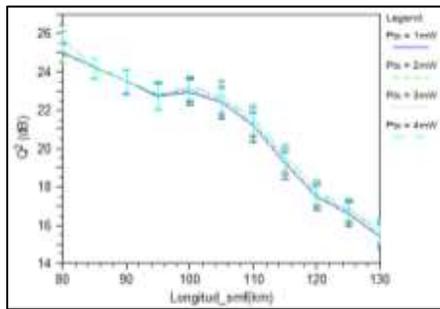


Figura 3.123. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

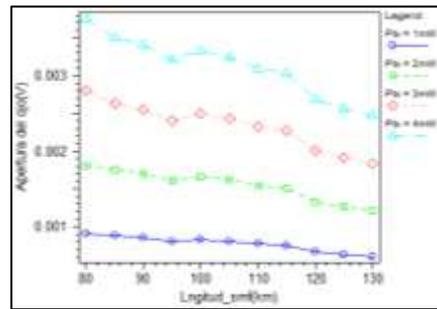


Figura 3.124. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

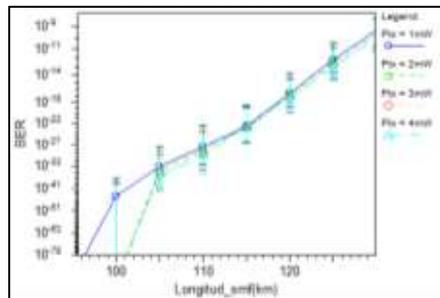


Figura 3.125. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

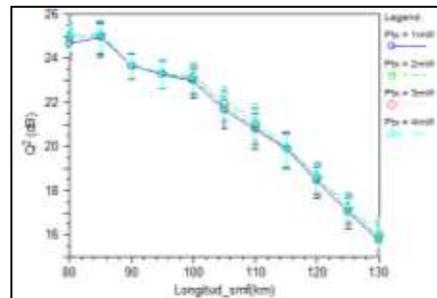


Figura 3.126. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

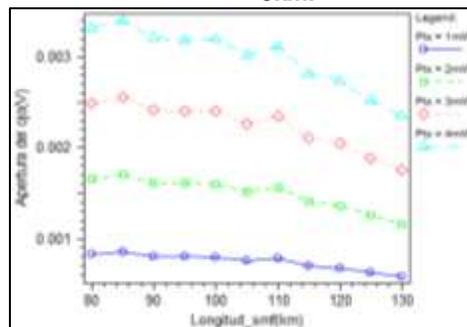


Figura 3.127. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

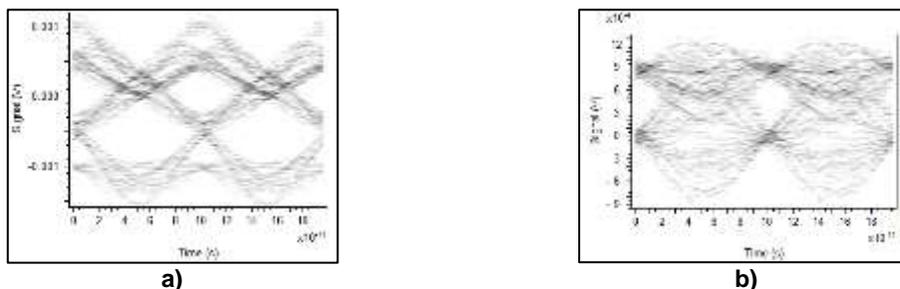
De las figuras 3.119, 3.120 y 3.121 se observa que para longitudes de SMF-28 menores a 100 km se presentan medidas de BER muy pequeñas y de factor Q muy alto, sin embargo, con la implementación del ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor solamente se ha incrementado la máxima distancia alcanzada en 20 km, por este motivo no se justifica el uso de un ecualizador, ya que con un aumento de la potencia de transmisión o ganancia del amplificador óptico de una forma calculada podrían obtenerse estos beneficios en longitud máxima alcanzada. Por otro lado, es notorio que para longitudes de SMF-28 superiores a 110 km, aumentar el número de taps garantiza mejores prestaciones del ecualizador, sin embargo, este hecho conlleva a una complejidad computacional tanto de hardware como de software más elevada.

En las figuras 3.122, 3.123, 3.124, 3.125, 3.126 y 3.127 se han dejado el número de taps fijo, ya que en las fablas 3.28 y 3.29 se observa que incrementar el número de taps no garantiza mejores prestaciones del ecualizador. Se destaca que el incremento de potencia de transmisión no garantiza mejores prestaciones del ecualizador en la BER y factor Q, reflejado como la superposición de las líneas de diferentes colores. En caso contrario, en la apertura del ojo se reflejan significativas mejorías al aumentar la potencia de transmisión.

A continuación se procede a tomar de las tablas 3.27, 3.28 y 3.29 la condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia transmisión de 1 mw, con el fin de observar las mejorías impuestas en el diagrama del ojo al realizar una comparación de los mismos sin y con EDC en cada uno de los ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE:

Tipo de Ecualizador	Número de Taps	Longitud de SMF-28 (km)
FFE-NL	8 en la sección FFE	130
DFE	5 en la sección FFE y 2 en la sección feedback	130
FFE-NL y DFE	5 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback	130

**Tabla 3.30. Condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK.**



**Figura 3.128. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK a) sin EDC, b) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 8 taps en la sección FFE. Longitud 130 km de SMF-28.**

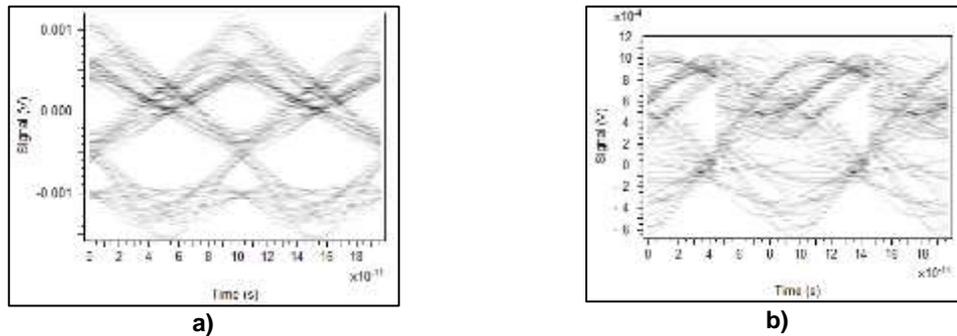


Figura 3.129. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD monocanal y con formato de modulación NRZ-OOK a) sin EDC, b) con EDC basada en un equalizador DFE en el lugar del receptor. Número de taps: 5 taps en la sección FFE y 2 taps en la sección DFE. Longitud 130 km de SMF-28.

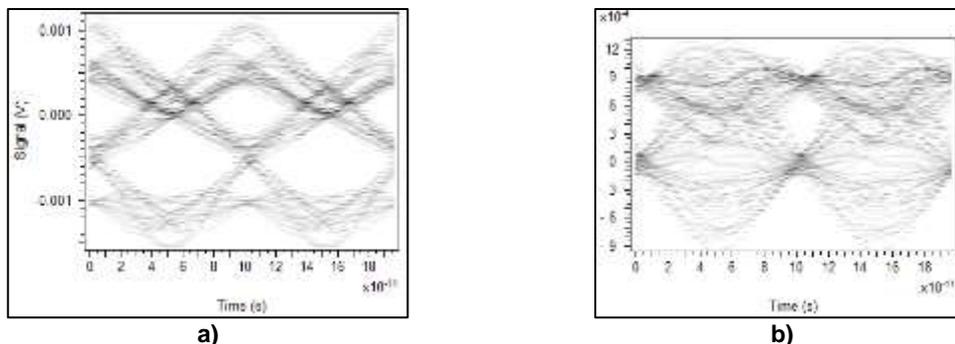


Figura 3.130. Diagrama del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK a) sin EDC, b) con EDC basada en un equalizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE del primer equalizador y 7 taps en la sección FFE del segundo equalizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28.

De las figuras 3.128, 3.129 y 3.130, se observa nuevamente que una de las mejores prestaciones que brindan las técnicas de equalización electrónica para la CD en el lugar del receptor frente al desempeño del sistema es aumentar la apertura del ojo y con ello se optimizan los umbrales de decisión. La asimetría en el ojo de la figura 3.129 b), esta vez no se puede mejorar significativamente con el aumento de la potencia, sino con el aumento del número de taps en busca de una mejor prestación del equalizador.

Las figuras 3.131, 3.132 y 3.133, muestra el espectro óptico después del modulador, sin y con EDC de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con equalizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE, mono canal y formato de modulación NRZ-DPSK, para la condición de longitud de SMF-28 y número de taps correspondientes a una mínima potencia transmisión de 1 mw establecidas en la tabla 3.30.

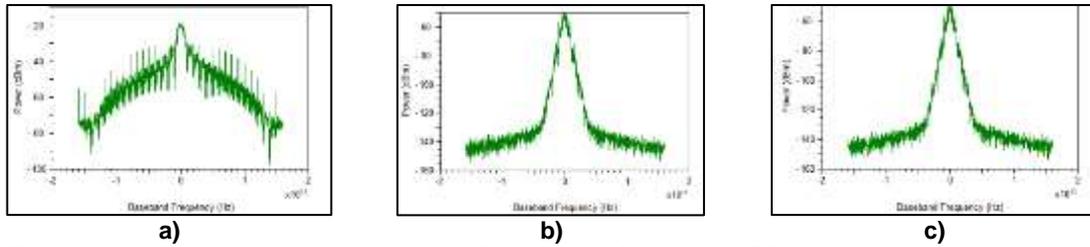


Figura 3.131. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK. Espectro óptico a) Después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 8 en la sección FFE. Longitud 130 km de SMF-28.

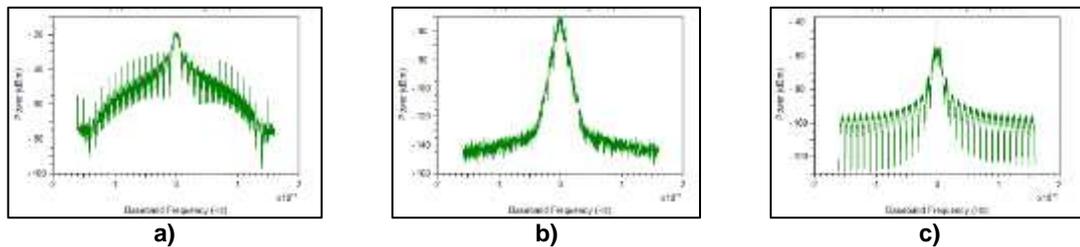


Figura 3.132. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y con formato de modulación NRZ-OOK. Espectro óptico a) Después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 taps en la sección FFE y 2 taps en la sección DFE. Longitud 130 km de SMF-28.

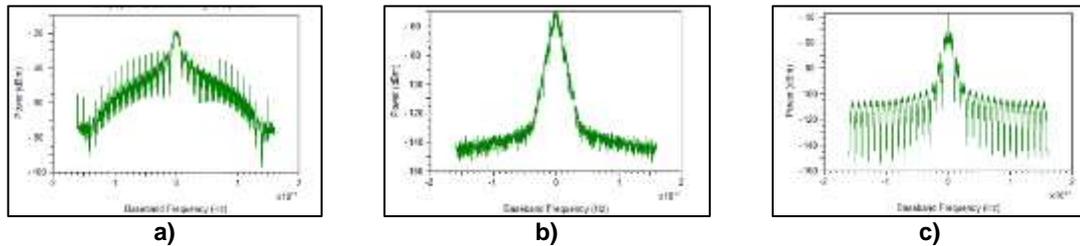


Figura 3.133. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, mono canal y con formato de modulación NRZ-DPSK. Espectro óptico a) Después del modulador, b) sin EDC, c) con EDC basada en un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor. Número de taps: 5 en la sección FFE del primer ecualizador y 7 taps en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28.

De las figuras 3.131, 3.132 y 3.133, se puede apreciar que la EDC con el formato de modulación NRZ-DPSK recupera en buena medida el espectro en banda base, sin embargo, el FFE-NL no es tan eficiente al recuperarlo.

De lo anteriormente dicho en el desarrollo del presente numeral, cabe resaltar que los ecualizadores FFE-NL, DFE y FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor presenta buenas prestaciones, sin embargo, el FFE-NL ataca únicamente la ISI pre-cursor (explicada detalladamente en la sección 1.5), presentándose como una limitante para su desempeño, caso opuesto al DFE que compensa la ISI pre y post cursor. El DFE a pesar de compensar la ISI pre y post cursor, presenta una asimetría en el diagrama del ojo que es corregida por el ecualizador en cascada FFE-NL y DFE.

### 3.3.5 Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.

Las figuras 3.134, 3.135 y 1.136 muestran la técnica de post-compensación electrónica para la CD, correspondiente a la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK, implementados en OptSim.

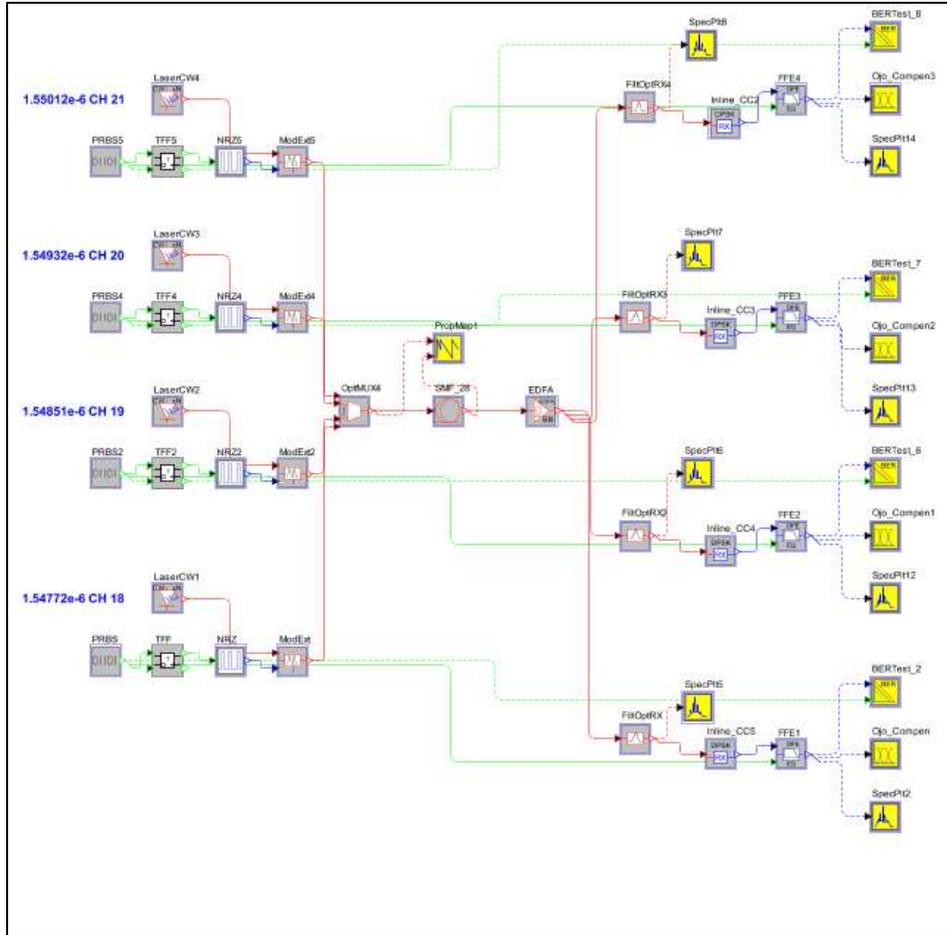


Figura 3.134. Técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.

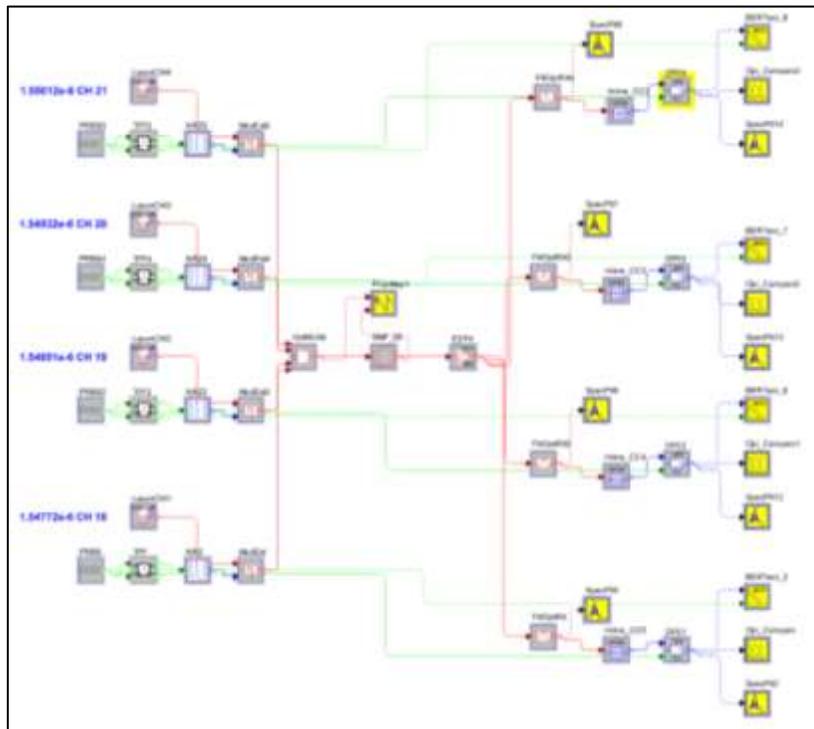


Figura 3.135. Técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.

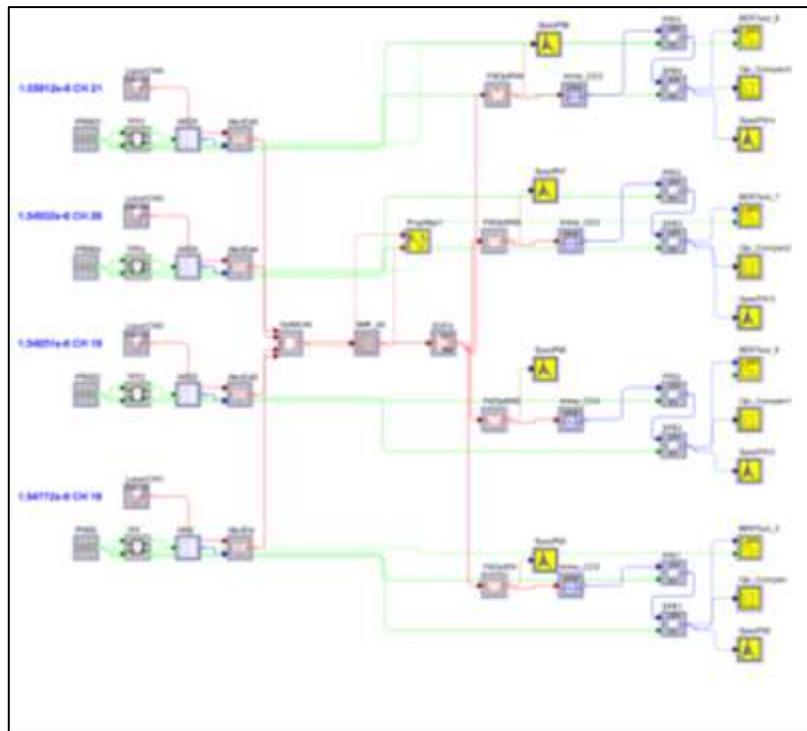


Figura 3.136. Técnica de post-compensación electrónica para la CD cuatro canales, con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor y formato de modulación NRZ-DPSK, implementada en OptSim.

Las figuras 3.137 y 3.138 muestran la constitución del receptor para las figuras 3.134, 1.135 y 1.136, configuradas como super bloques en OptSim.

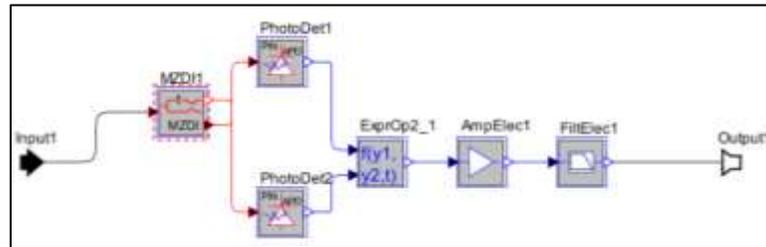


Figura 3.137. Súper bloque del receptor balanceado. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.

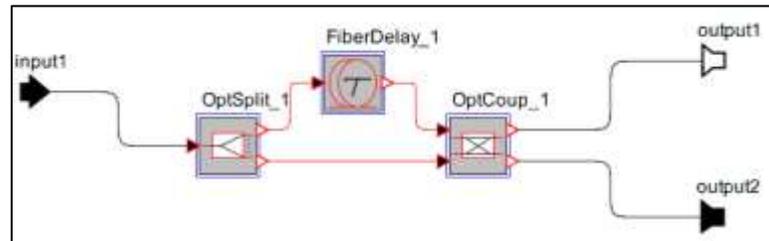


Figura 3.138. Contenido del super bloque MZDI (Interferómetro Diferencial Mach-Zehnder).

La figura 3.139 muestra el mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y, FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.

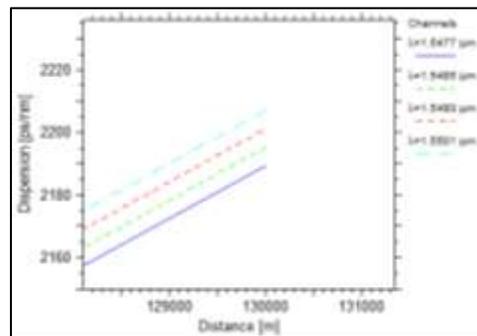


Figura 3.139. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK.

A continuación se muestran las medidas de BER estimado, Factor Q estimado, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21, para la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y, FFE-NL y DFE en cascada en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-OOK, longitud de SMF-28 de 130km y número de taps correspondientes a una mínima potencia transmisión de 1 mw especificada en la tabla 3.30.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Apertura del ojo (v)	Dispersión acumulada (dispersión compensada ps/nm)
18	2.7441e-009	15.31	6.1653e-004	2189
19	4.6321e-009	15.18	6.1110e-004	2195
20	1.0377e-008	14.97	6.0564e-004	2201
21	2.0797e-008	14.78	6.0173e-004	2207

Tabla 3.31. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Configuración 5 con un ecualizador FFE-NL en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK. Número de taps: 8 en la sección FFE. Longitud 130 km de SMF-28

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Apertura del ojo (v)	Dispersión acumulada (dispersión compensada ps/nm)
18	1.8746e-009	15.41	6.0115e-004	2189
19	2.7218e-009	15.31	5.9499e-004	2195
20	4.7523e-009	15.31	5.9499e-004	2201
21	7.8370e-009	15.04	5.8503e-004	2207

Tabla 3.32. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28.

Canal	BER estimada	Factor Q estimado (dB)	Apertura del ojo (v)	Dispersión acumulada (dispersión compensada ps/nm)
18	4.8494e-010	15.72	5.7800e-004	2189
19	8.0122e-010	15.61	5.7350e-004	2195
20	1.5537e-009	15.45	5.6994e-004	2201
21	2.9546e-009	15.29	5.6744e-004	2207

Tabla 3.33. Medidas de BER estimado, Factor Q, apertura del ojo y dispersión acumulada (dispersión compensada) de los canales 18, 19, 20 y 21. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en cascada FFE-NL y DFE en el lugar del receptor, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK. Número de taps: 5 en la sección FFE del primer ecualizador, 7 en la sección FFE del segundo ecualizador con 2 taps en la sección feedback. Longitud 130 km de SMF-28.

De las tablas 3.31, 3.32 y 3.33 se observa, al igual que el caso de estudio de la ecualización con el formato de modulación NRZ-OOK, que cada uno de los canales presenta dispersión acumulada (compensada) diferente entre ellos, pero iguales para los tres ecualizadores, esto se debe a que la longitud del enlace es la misma que se está examinando (130km), por otro lado, es notorio que los canales presentan fluctuaciones en la BER y el factor Q debido a que cada canal descubre su propia dispersión, por lo que se hace necesario que la ecualización se deba realizar a cada uno de los canales de forma independiente, variando el número de taps según la cantidad de dispersión acumulada a compensar.

El anexo Z muestra los diagramas del ojo de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizadores FFE-NL, DFE y, FFE-NL y DFE en cascada, cuatro canales y formato de modulación NRZ-DPSK, bajo las condiciones especificadas en la tabla 3.30. En estos diagramas de ojo no se observan significativas variaciones de un canal al otro.

#### **4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN PARA LA CD EVALUADAS, MEDIANTE LAS CUALES PRESENTAN UN DESEMPEÑO ÓPTIMO EN UNA RED WDM.**

Las actividades a desarrollar se enfocan en identificar mediante el análisis de desempeño de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD evaluadas en el capítulo 3, las principales características a través de las cuales una red WDM presenta un desempeño óptimo.

##### **4.1 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD**

El objetivo de esta sección se aborda a través de los siguientes enfoques:

1. Escoger la potencia de transmisión que permita alcanzar una máxima longitud cumpliendo con parámetros de desempeño establecidos por operadores WDM.
2. Elegir la técnica de compensación óptica para la CD que presente mejores prestaciones en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK.
3. Seleccionar el formato de modulación mediante el cual la técnica de compensación óptica elegida en el numeral anterior presenta un desempeño óptimo en una red WDM.

Fundamentados en el análisis del desempeño de las técnica de pre y post compensación ópticas para la CD bajo formatos de modulación NRZ- OOK y NRZ-DPSK evaluadas en la sección 3.2, se aprecia una dependencia de estas técnicas frente a la potencia de transmisión, para las cuales una condición de máxima potencia de 4 mw, genera las mejores condiciones en cuanto a un incremento de la máxima distancia alcanzada, teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación con los formatos de modulación NRZ-OOK y DPSK.

En cuanto a las técnicas de compensación ópticas para la CD evaluadas en la sección, se encuentran leves mejorías de la técnica de pre-compensación frente a la técnica de post-compensación. En este numeral, al igual que diferentes estudios concernientes a las técnicas de compensación para la CD, se enfatiza el análisis de resultados en la OSNR, ya que a pesar de no mostrar las degradaciones temporales producidas en la señal, presenta una correlación con la BER y el factor Q, constituyéndose en un parámetro de gran utilidad para la monitorización del desempeño en una red WDM. A continuación se resaltan del análisis de desempeño evaluado en la sección 3.2 las medidas de OSNR de la técnica de pre-compensación y post-compensación en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ- DPSK.

Número de Spans	OSNR Pre-compensación (dB)	OSNR Post-compensación (dB)
1	19.89591	19.89471
2	17.34071	17.33941
3	15.72615	15.72453
4	14.54777	14.54583
5	13.62002	13.61763
6	12.85464	12.85186
7	12.20298	12.20003

Tabla 4.1. Medidas OSNR del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace de 500 km. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SMF-28 y 14.875 km de DCF. Técnica de pre-compensación y post-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-OOK.

Número de Spans	OSNR Pre-compensación (dB)	OSNR Post-compensación (dB)
1	17.10035	17.06190
2	15.42295	15.38914
3	14.20497	14.16641
4	13.25250	13.20630
5	12.47080	12.41525
6	11.80779	11.74212
7	11.23128	11.15688
8	10.72022	10.64081
9	10.26137	10.17929

Tabla 4.2. Medidas OSNR del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace de 500 km. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 80 km de SMF-28 y 17 km de DCF. Técnica de pre-compensación y post-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.

De las tablas 4.1 y 4.2 se corroboran las leves mejorías impuestas por la técnica de pre-compensación óptica para la CD en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. En representación de la distancia alcanzada con pre-compensación, para diferentes potencias de transmisión y con los formatos de modulación estudiados en el desarrollo del trabajo de grado, se presentan las figuras 4.1 y 4.2.

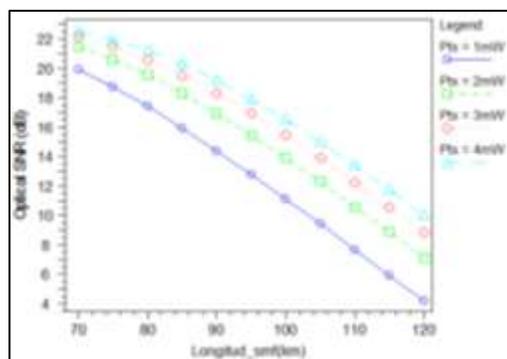


Figura 4.1. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-OOK.

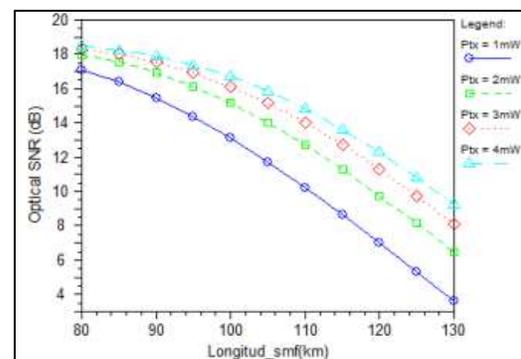


FIGURA 4.2. OSNR vs Longitud de SMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.

En relación a las tablas 3.4, 3.12 y figuras 4.1 y 4.2, se expone cómo la técnica de pre-compensación óptica para la CD con el formato de modulación NRZ-OOK para potencia máxima, extiende el alcance del enlace óptico de 70 km a 112 km de SMF-28, compensando alrededor de 1800 ps/nm, mientras que el formato de modulación NRZ-DPSK extiende el alcance de 80 a 125 km de SMF-28, compensando alrededor de 2100 ps/nm.

En conclusión, se procede a mostrar las principales características mediante las cuales las técnicas de compensación para la CD presentan un desempeño óptimo:

- Potencia de transmisión de 4 mw.
- Longitud del span: 105.48 km, compuesto por 87 km de SMF-28 (máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación con del formato de modulación NRZ-DPSK) y 18.48 km de DCF.
- Técnica de pre-compensación óptica para la CD.
- Formato de modulación NRZ-DPSK.

En suma de las principales características identificadas anteriormente, se procede a implementar una configuración de la técnica de pre-compensación óptica para la CD, cuatro canales con formato de modulación NRZ-DPSK, fig.4.3, que permita corroborar su desempeño en una red WDM, tabla 4.3.

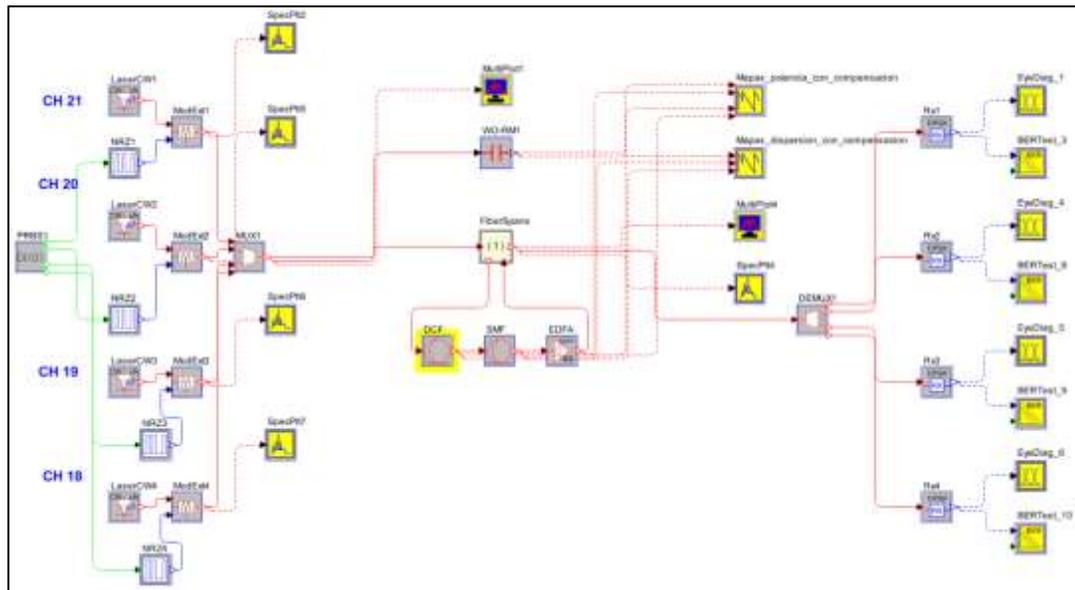


Figura 4.3. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK, cuatro canales, potencia de transmisión de 4 mw, longitud del span: 87 km de SMF-28 y 18.48 km de DCF.

Spans	OSNR (dB)	BER	Q(dB)	APERTURA DEL OJO (V)
1	18.12814	3.2818e-152	28.384	6.5341e-003
2	17.11478	1.7198e-114	27.125	6.5905e-003
3	16.30386	2.2135e-068	24.829	6.2530e-003
4	15.62605	5.4502e-040	22.401	5.8485e-003
5	15.04384	5.9031e-029	20.911	5.6515e-003
6	14.53315	4.3845e-024	20.047	5.2548e-003

Tabla 4.3. Medidas de OSNR, BER, Factor Q y apertura del ojo. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK, potencia de transmisión de 4 mw, longitud del span: 87 de SMF-28 y 18.48 km de DCF.

De la tabla 4.3 se han tomado 6 spans para cubrir la distancia propuesta de 500 km, donde se obtienen parámetros de monitoreo óptimos para una red WDM.

## 4.2 TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ELECTRÓNICAS PARA LA CD

El objetivo de esta sección se aborda a través de los siguientes enfoques:

1. Escoger la potencia de transmisión que permita alcanzar una máxima longitud cumpliendo con parámetros de desempeño establecidos por operadores WDM.
2. Elegir la técnica de compensación electrónica para CD que presente mejores prestaciones en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK.
3. Identificar el ecualizador que presenta las mejores prestaciones en la técnica de compensación electrónica para la CD, elegida en el numeral 2.
4. Seleccionar el formato de modulación mediante el cual la técnica de compensación óptica elegida en el numeral 2 y 3 presenta un desempeño óptimo en una red WDM.

Fundamentados en el análisis de desempeño de la técnica de pre y post compensación electrónica para la CD bajo formatos de modulación NRZ- OOK y NRZ-DPSK evaluadas en la sección 3.3, se destaca la dependencia de estas técnicas frente a la potencia de transmisión, para las cuales una condición de máxima potencia de 4 mw ofrece las mejores condiciones en cuanto a un incremento de la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación, con los formatos de modulación y optimización de los parámetros de monitoreo óptico.

Con base a las técnicas de compensación electrónicas para la CD para los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ- DPSK evaluadas en el capítulo 3, se encuentra que la post-compensación electrónica con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE, presenta mayor flexibilidad frente a la pre-compensación con el ecualizador FFE-NL, debido a que está última requiere una configuración y alteración más compleja en el transmisor, así como el cálculo independiente de los coeficientes tap, debido a que este no utiliza el criterio MMSE. En acuerdo a lo

anterior y a la evaluación del desempeño realizada en las secciones 3.3.2 y 3.3.4, los ecualizadores que presentan el mejor desempeño en la post-compensación bajo los formatos demodulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK son el ecualizador DFE y el ecualizador en cascada FFE-NL y DFE. Las principales características de monitoreo son recolectadas del capítulo 3 y mostradas en las figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11.

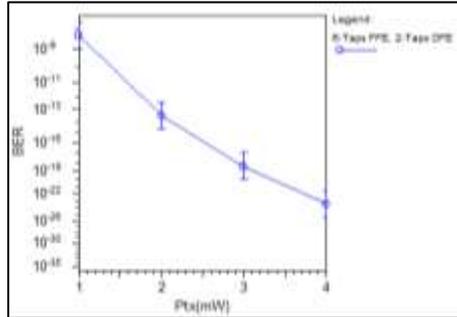


Figura 4.4. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.

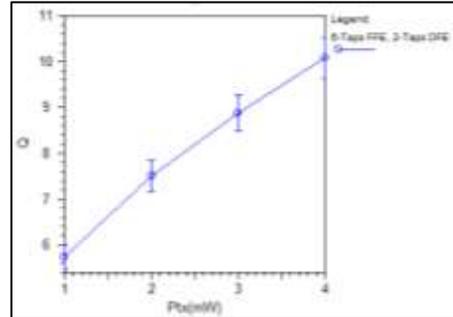


Figura 4.5. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SMF-28 de 120 km.

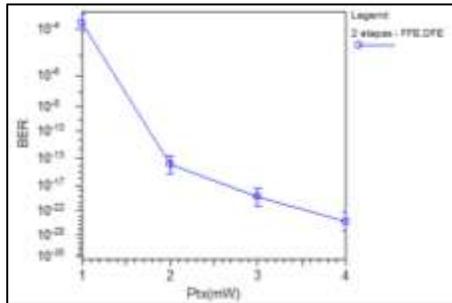


Figura 4.6. BER estimada vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 km.

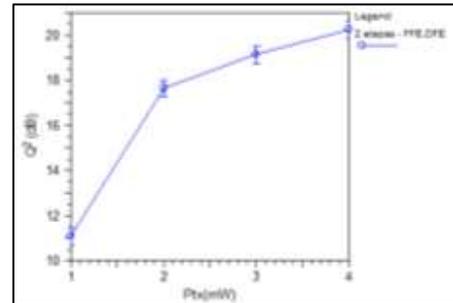


Figura 4.7. Factor Q estimado vs Potencia de transmisión. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 km.

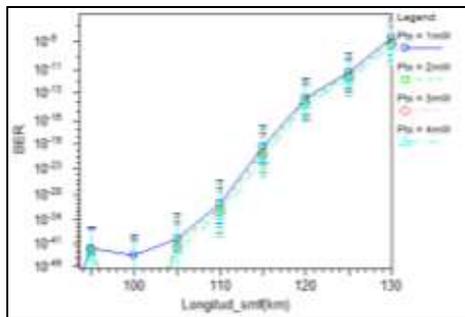


Figura 4.8. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

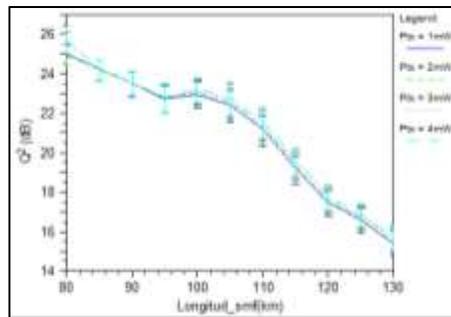


Figura 4.9. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador en el lugar del receptor, mono canal. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5 km.

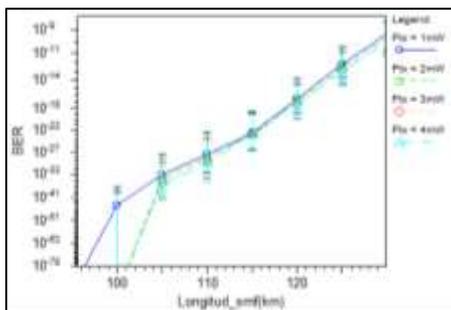


Figura 4.10. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

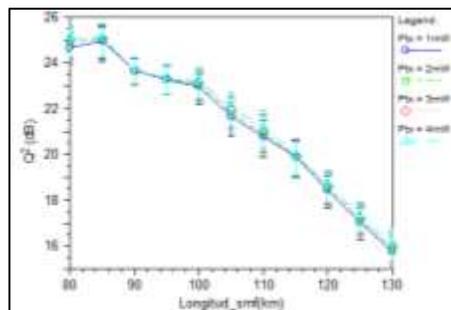


Figura 4.11. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa y 2 en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km.

De las figuras 4.4 y 4.5 que representan la BER y el factor Q respectivamente para el formato de modulación NRZ-OOK con el ecualizador DFE, y las figuras 4.6 y 4.7 que representan la BER y el factor Q respectivamente para NRZ-OOK con el ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE, se aprecia que ambos ecualizadores presentan un desempeño similar para compensar alrededor de 2021 ps/nm (aproximadamente 120 km de SMF-28) a máxima potencia, sin embargo, el ecualizador en cascada FFE-NL y DFE posee mejores prestaciones en el factor Q, mejorando de esta manera la calidad de la señal. Para el caso análogo, las figuras 4.8 y 4.9 que representan la BER y el factor Q respectivamente para el formato de modulación NRZ-DPSK con el ecualizador DFE, y las figuras 4.10 y 4.11 que representan la BER y el factor Q respectivamente para NRZ-DPSK con el ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE, se muestra que los incrementos de

potencia a medida que aumenta la longitud de SMF-28 después de los 105 km, no mejoran significativamente el desempeño, por lo tanto cualquiera de los dos ecualizadores puede compensar los 2189 ps/nm (aproximadamente 130 km de SMF-28) máximos establecidos con una BER mínima para una potencia máxima según las tablas 3.28 y 3.29.

En base a lo anterior, se considera que el formato de modulación NRZ-OOK es el formato que más se beneficia de las prestaciones de la ecualización aumentando la máxima distancia alcanzada teniendo en cuenta efectos de CD y atenuación de 70 km a un poco más de los 120 km, adicionalmente es un formato que comercialmente ha sido muy utilizado por su simplicidad en el despliegue, brindando la oportunidad a operadores WDM de extender el alcance de un enlace óptico sin cambiar la constitución del transmisor (formato de modulación, laser, entre otros) y del receptor (foto-detector, filtro electrónico, pre-amplificador). Bajo las anteriores consideraciones y con el objeto de ampliar aún más la longitud de SMF-28 a máxima distancia con ecualización, se obtienen las siguientes características de diseño:

- Potencia de transmisión 4 mw.
- Longitud de SMF-28 entre 120 y 140 km.
- Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE, que contiene 9 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección feedback.
- Formato de modulación NRZ-OOK.

En suma de las principales características identificadas anteriormente, se procede a implementar una configuración de la técnica de post-compensación electrónica para la CD con formato de modulación NRZ-OOK, fig.4.12, que permita corroborar su óptimo desempeño en una red WDM, tabla 4.4.

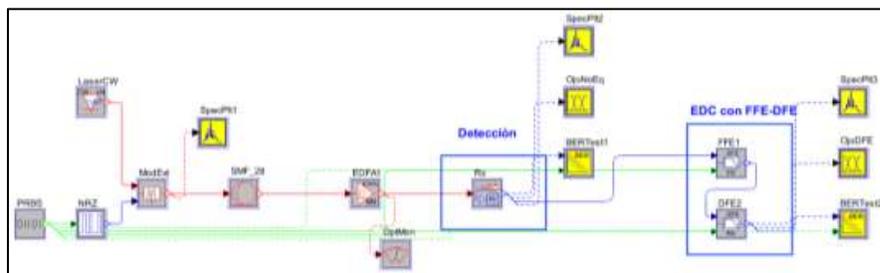


Figura 4.12. Técnica de post-compensación electrónica para la CD con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. Formato de modulación NRZ-OOK, potencia de transmisión de 4 mw, longitud SMF-28 entre 120 y 140 km.

Longitud de SMF-28 (km)	Dispersión Acumulada (ps/nm)	OSNR (dB)	BER	Q (dB)	Apertura del ojo (v)
120	2021	20.81	2.8674e-025	20.296	3.4794e-003
126	2122	19.99	7.4909e-016	18.037	3.3185e-003
130	2189	19.37	6.0507e-012	16.623	3.1097e-003
136	2290	18.34	4.1563e-009	14.584	3.0635e-003

Tabla 4.4. Máxima longitud alcanzada con una potencia de 4mw y formato de modulación NRZ-OOK. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback.

Según los datos recolectados en la tabla 4.4, se pueden compensar alrededor de 2290 ps/nm (aproximadamente 136 km de SMF-28) con EDC mediante el ecualizador de dos etapas para una BER mínima de  $10^{-9}$ , o se pueden compensar alrededor de 2021 ps/nm (aproximadamente 120 km de SMF-28) para valores máximos de desempeño para una BER de  $10^{-25}$  donde la EDC puede ser muy atractiva por su excelente desempeño, figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

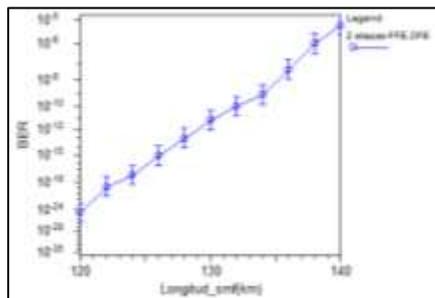


Figura 4.12. BER estimada vs Longitud de SMF-28. Potencia de transmisión de 4mw. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE en la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 a 140 km con incrementos de 1km. Formato de modulación NRZ-OOK.

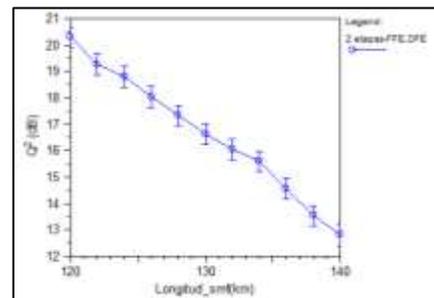


Figura 4.13. Factor Q estimado vs Longitud de SMF-28. Potencia de transmisión de 4mw. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE en la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 a 140 km con incrementos de 1km. Formato de modulación NRZ-OOK.

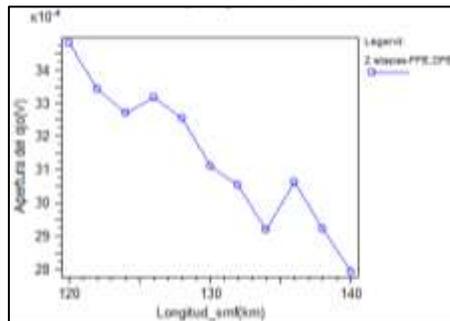


Figura 4.14. Apertura del ojo vs Longitud de SMF-28. Potencia de transmisión de 4 mw. Técnica de post-compensación con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE que incluye 9 taps en la sección FFE en la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa y 2 taps en la sección feedback. Longitud de SMF-28 de 120 a 140 km con incrementos de 1km. Formato de modulación NRZ-OOK.

De las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se puede apreciar que la máxima distancia alcanzada con mínimos parámetros de monitoreo están en un rango de 135 a 138 km de SMF-28 con una BER estimada de  $10^{-9}$ , un factor Q estimado de 14 y una apertura del ojo de 3 mv.

Considerado que para un arreglo de cuatro canales se presentan dispersiones diferentes en cada uno, se hace necesaria la ecualización independiente por cada canal, por lo tanto, se generan los resultados de la tabla 4.5 variando el número de taps en las secciones del ecualizador en cascada FFE-NL y DFE, para una potencia máxima de 4 mw, longitud de SMF-28 de 136 km, formato de modulación NRZ-OOK. La configuración es mostrada en la figura 4.15.

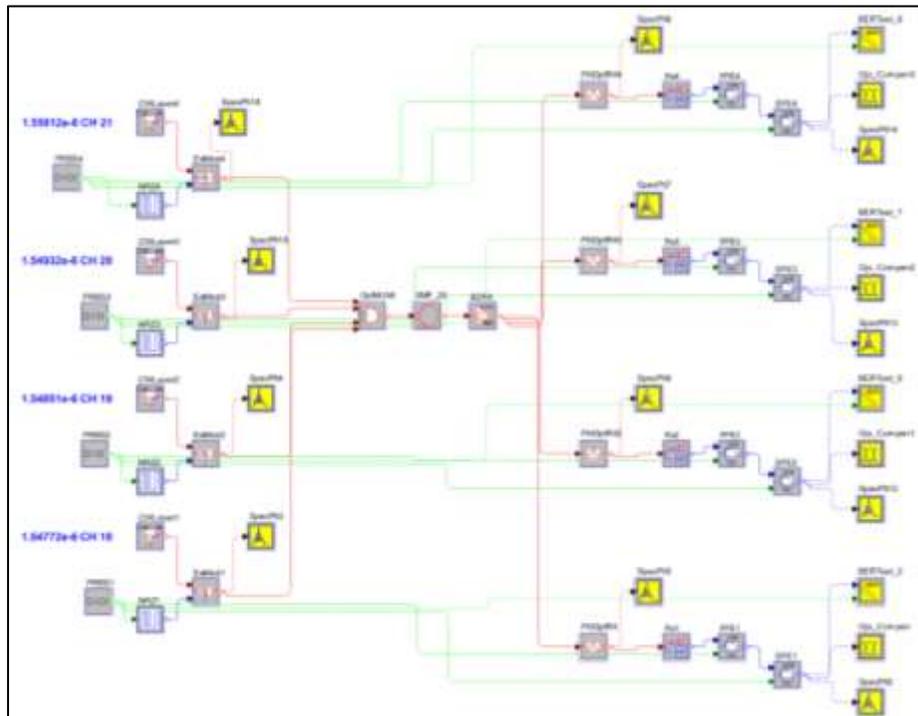


Figura 4.15. Técnica de post-compensación electrónica para la CD, cuatro canales con ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE. Formato de modulación NRZ-OOK, potencia de transmisión de 4 mw, longitud de SMF-28 de 136 km.

Canal	Dispersión Acumulada (ps/nm)	Número de taps			BER	Q (dB)	Apertura del ojo (v)
		Sección FFE primera etapa	Sección FFE segunda etapa	Sección feedback segunda etapa			
18	2290	9	7	2	4.1648e-009	14.58	3.0635e-003
19	2296	14	8	2	7.7237e-009	15.05	2.7249e-003
20	2302	12	8	2	5.4423e-009	15.14	2.8401e-003
21	2309	12	8	2	2.0567e-009	15.00	2.8564e-003

Tabla 4.5. Parámetros de monitoreo por canal para una distribución de taps determinada según la dispersión acumulada a compensar para la técnica de post-compensación electrónica para la CD un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE para una longitud de SMF-28 de 136 km, formato de modulación NRZ-OOK y potencia de transmisión de 4mw.

Como se observa en la tabla 4.5, tomando como referencia el canal 18, se hace necesario ajustar el número de taps por canal debido a que estos presentan una dispersión diferente, logrando de esta manera optimizar los parámetros de monitoreo. En caso de no realizarse un ajuste en los taps para cada canal, los parámetros se degradarán a medida que la dispersión aumenta, debido a la longitud de onda asignada a cada uno de estos.

#### 4.3 ANALISIS COMPARATIVO DE LAS TECNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS Y ELECTRÓNICAS

Finalmente, y considerando que uno de los aportes de este trabajo de grado consiste en presentar una comparativa entre las técnicas ópticas y electrónicas para CD en redes WDM, se genera el resumen consignado en tabla 4.6 bajo condiciones óptimas presentadas y ya mencionadas en las secciones 3.2, 3.3, 4.1.1 y 4.1.2.

Tipo de compensación	Óptica - ODM		Electrónica - EDC		
Técnica	Pre-compensación		Post-compensación		
Formato de modulación	NRZ-DPSK		NRZ-OOK		
Lugar donde aplica	En línea		En el lugar del receptor		
Elemento que interviene	DCF		Ecuador en cascada FFE-NL y DFE		
Parámetros	Coeficiente de atenuación (dB/km)	Coeficiente de dispersión (ps/nm.km)	Número de taps		
			Sección FFE primera etapa	Sección FFE segunda etapa	Sección feedback segunda etapa
	0.5	-80	9	7	2
Longitud (km)	SMF-28	DCF	SMF-28		
	125	26.56	136		
Dispersión Compensada (ps/nm)	2100		2290		
BER	1.9365e-009		4.1563e-009		
Factor Q (dB)	15.930		14.584		
OSNR (dB)	10.82		18.34		

Tabla 4.6. Análisis comparativo de las técnicas ópticas y electrónicas para la CD. Potencia de transmisión de 4mw. Velocidad de transmisión de 10 Gbps. Leyenda: Longitud efectiva del enlace determinada por la longitud de la SMF-28.

Con base en la tabla 4.6, se destaca que la pre-compensación óptica compensa 125km de SMF-28, aproximadamente  $2100 \frac{ps}{nm \cdot km}$ , mientras que la post-compensación electrónica compensa 136km, aproximadamente  $2290 \frac{ps}{nm \cdot km}$ ; por lo tanto, la post-compensación electrónica con el ecualizador en cascada FFE-NL Y DFE, presenta un mejor desempeño, ya que compensa mayor CD incrementando el alcance del enlace, utilizando como formato de modulación tradicional NRZ-OOK y con la menor complejidad computacional posible en el ecualizador (menor número de taps) para generar parámetros de desempeño mínimos establecidos por operadores WDM.

Es importante aclarar que los parámetros de desempeño pueden mejorar si se aumenta la complejidad del ecualizador, sin embargo, esto puede requerir una mayor potencia de transmisión que está por fuera del rango de estudio, además de demandar en la físicamente circuitos integrados de muy alta velocidad, capaces de realizar el procesamiento digital de señales requerido para la compensación electrónica. Adicionalmente se recalca que la pre-compensación óptica puede lograr mayor alcance si se aumenta el número de spans, para lo cual se deben desplegar una mayor cantidad de DCF y de amplificadores, estudio que es llevado a cabo en la sección 3.2; así que debe considerarse que la EDC basada en ecualizadores puede ser muy útil para redes metropolitanas de corto alcance que están en el rango de los 100 a 140 km, pero como se mencionó en la sección 1.3, teóricamente puede incrementarse dicho alcance mejorando las características del receptor aplicando algoritmos de estimación como MLSE, temática que se deja para estudios futuros.

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

En el trabajo de grado se alcanzaron los objetivos propuestos, generando un conocimiento novedoso del comportamiento de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD, evaluando su desempeño e identificando las principales características mediante las cuales presentan un comportamiento óptimo en redes WDM. Por otro lado el presente trabajo de grado se constituye como una guía de gran utilidad para los proveedores y operadores de redes WDM, debido a las ventajas que ofrece la compensación de la CD en el desempeño una red WDM. De igual manera permite generar nuevos procesos de investigación y desarrollo en el área de la compensación de dispersión en redes WDM.

### 5.1 CONCLUSIONES

- Las técnicas de compensación ópticas para la CD presentan una alta dependencia frente a variaciones de potencias, longitud de la fibra óptica (conlleva al empleo de DCF), número de spans y formato de modulación. El lugar u orden de la DCF con respecto a la fibra óptica muestra leves mejorías de una técnica frente a otra.
- Para configuraciones multicanal se tiene que la EDC a diferencia de la ODM, presenta una configuración especial para cada uno de los canales a multiplexar y a de-multiplexar. Esto se deba a que cada canal descubre su propia dispersión y por lo tanto, cada ecualizador debe tener una configuración en particular.
- Las técnicas de compensación electrónicas para la CD presentan una alta dependencia frente a variaciones de potencias (NRZ-OOK), lugar donde se haga la compensación (lugar en el transmisor), longitud de la fibra óptica (conlleva al empleo de DCF), tipo de ecualización (FFE-NL, DFE y cascada), complejidad computacional (número de taps) y formato de modulación.
- Las técnicas de post-compensación electrónicas para la CD basadas en ecualizadores, son considerablemente útiles para compensar alrededor de los 2290 ps/nm (aproximadamente 136 km de SMF-28) sin necesidad de intervenir el tramo de fibra óptica principal, debido a que su configuración se haya en el lugar del transmisor y el receptor.
- La técnica de pre-compensación electrónica para la CD con ecualizadores, es una alternativa teóricamente realizable, sin embargo, su alta complejidad no la hace viable para implementarla en una red WDM, ya que interviene las características del transmisor, por lo que es funcionalmente difícil de implementar.

- Según la recomendación ITU-T G. 959.1, en su última revisión del 2009, estipula que la máxima dispersión compensada con EDC para un enlace óptico con fibra SMF, es del alrededor de 2400 ps/nm (aproximadamente 120km), recalcando el aporte de la configuración en cascada al extender esta longitud a 136 km.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Para realizar el estudio del desempeño de las diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD en redes WDM, son necesarios una serie de recomendaciones que facilitan la obtención y el análisis de los resultados. Estas son:

- La evaluación del desempeño de la EDC en ecualizadores mediante la herramienta de simulación optSim de Rsoft, solamente permite utilizar ecualizadores FFE-NL, DFE y combinarlos con el criterio de optimización MMSE.
- El modo bloque y el modo muestra de la herramienta de simulación optSim de Rsoft permite el análisis del desempeño de las técnicas de compensación ópticas para la CD, mientras que para las técnicas de compensación electrónicas, el modo bloque se constituye como la única forma práctica para implementar estas últimas técnicas.
- La herramienta de simulación optSim de Rsoft, actualmente no presenta módulos que permitan implementar la técnica de ecualización en el lugar del transmisor para la modulación externa.

## 5.3 TRABAJOS FUTUROS

A través del cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, fue posible identificar nuevas investigaciones concernientes al desempeño de las técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD. Estas son:

- Analizar la incidencia de la CD en redes WDM con compensación de dispersión a distintos formatos de modulación, tipos de fibra óptica, espaciamentos entre canales y velocidades de transmisión.
- Investigar la implementación de las técnicas de compensación ópticas para la CD con uso de Fibras Bragg Grating, conjugado de fase óptica y técnicas de compensación simétricas con DCF (pre y post-compensación).
- Estudiar la técnica de compensación electrónica para la CD compartida entre el lugar del transmisor y receptor.
- Evaluar el desempeño de redes WDM con técnicas de compensación ópticas y electrónicas de forma dual.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Cablesa.Ltda, “Tipos de fibra óptica”, Tecnologías de la comunicación y la información, Julio 2008. Página web disponible en: <http://www.cablesa.com/categories/blog>
- [2] H. Bülow, F. Buchali, y Axel Klekamp, “Electronic Dispersion Compensation”, Journal of lightwave technology, Vol 26, No.1, Enero, 2008.
- [3] M. Singh, A. Sharma, y R.S. Kaler, “Optimizing amplifier spacing to improve performance in RZ-rectangular pulse based 10 Gb/s single channel dispersion managed optical communication system”, ScienceDirect Optics Communications, Septiembre, 2008.
- [4] D. Breuer, K. Jirgensen, F. Kippers, A. Mattheus, I. Gabitov, S.K. Turitsyn, “Optimal schemes for dispersion compensation of standard monomode fiber based links”, ScienceDirect Optics Communications, Julio, 1997.
- [5] B. Jain, M. Kumar, “Simulative analysis of pre- and post-compensation using CRZ form at in WDM optical transmissi on link”, ScienceDirect Optik, Mayo, 2009.
- [6] H. Bülaw, “Tutorial Electronic Dispersion Compensation”, Alcatel-Lucent, Marzo 2007.
- [7] M.S O`Suvillan, K. Roberts, C Bontu, “Electronic Dispersion Compensation Techniques for optical Communicattions Systems”, white paper, Vol.2, 2005.
- [8] S. L. Woodward, S.Y. Huang, M. D. Feuer, M. Boroditsky, “Demonstration of an Electronic Dispersion Compensator in a 100-km 10-Gb/s Ring Network”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.15, No.6, Junio, 2006.
- [9] J. Zheng, H. T. Mouftah, “Optical WDM Networks: Concepts y Design Principles”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004.
- [10] M.C. Boquera , “Tutorial de Comunicaciones Ópticas”, Editorial Díaz Santos, 2005. Página web disponible en: <http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm>
- [11] C. E. Sangucho, “Diseño de la Red de Backhaul Para una Nueva Salida de Cable Submarino, Utilizando la Fibra Óptica del Oleoducto de Crudos Pesados a Disposición del Estado Ecuatoriano”, Tesis de maestría, Abril, 2009.
- [12] R. Guitierrez, “Diseño de un Enlace de Fibra Óptica”, Tesis de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- [13] J. Wayle, Sons, “Fiber Optics Communications Systems”, Editorial G.P. Agrawal, 1997.
- [14] ITU-T Rec. G. 694.1, “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid”, Telecommunications Standardization Sector of ITU, Junio, 2002.
- [15] Group TELNET, “Fibra Óptica para NGN – Dispersión Cromática y PMD”, Redes Inteligentes S.A, Noviembre, 2009.
- [16] ITU-T Rec. G.694.2, “Características de los medios de transmisión – Características de los componentes y los subsistemas ópticos: Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda”, Telecommunications Standardization Sector of ITU, Diciembre, 2003.
- [17] E. J. Gualda, “Optimización de las Prestaciones de Enlaces Ópticos Submarinos de Gran Capacidad y Larga Distancia Mediante el Control de la Dispersión”, Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Catalunya, 2000.

- [18] S. Grande, "Técnicas de Ecuación", Transmisión de datos y telemetría, Universidad Central de Venezuela, 2007.
- [19] D. van den Borne, "Robust Optical Transmission Systems – Modulation and Equalization", White Paper, 2008.
- [20] ITU-T Rec. O.201, "Aparatos de medida para parámetros de canales ópticos", Telecommunications Standardization Sector of ITU, julio, 2003
- [21] A. Pizzinat, A. Schiffini, F. Alberti, A. Paoletti, D. Caccioli, P. Griggio, P. Minzioni, F. Matera, "Numerical and Experimental Comparison of Dispersion Compensation Techniques on Different Fibers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol 14, No. 10, Octubre, 2002.
- [22] Leading Optical Innovation, "Comparación del estándar ITU-G. 692 A, B, C y D", White Paper, 2004.
- [23] ITU-T Rec.697, "Optical monitoring for DWDM systems", Telecommunications Standardization Sector of ITU, Junio, 2004.
- [24] A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini, F. Forghieri, "Optical vs. Electronic chromatic dispersion compensation in WDM coherent PM-QPSK systems at 111 Gbit/s", IEEE Photonics Technology Letters, Enero, 2010.
- [25] I. Gabitov, E. G. Shapiro, S. K. Turitsyn, "Asymptotic breathing pulse in optical transmission systems with dispersion compensation", Physycal Review E, Marzo, 1997.
- [26] ITU-T Rec.G.652, "Characteristics of a single-mode optical fibre cable", Telecommunications Standardization Sector of ITU, Noviembre, 2000.
- [27] V. Alwayn, "Optical Network Design and Implementation", Cisco Press, Marzo, 2004.
- [28] R. Olivares, "Amplificación Óptica", Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, 2007.
- [29] J. P. Laude, W. Goralski, "Optical Networking & Wdm (Standards & Protocols)", Artech House Inc., 2002.
- [30] Cisco Systems, Inc., "Introduction to DWDM for Metropolitan Networks", 2000. Documento PDF disponible en:  
<http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/dwdm/dwdm.pdf>
- [31] J. Salazar, L. Mora, "Criterios para el Diseño de una Red de Paquetes IP sobre una Red Óptica DWDM (IPoDWDM)", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2003.
- [32] J. F. Grijalba, G. A. Gomez, "Análisis del Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas Sobre Redes WDM", Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Agosto, 2010.
- [33] A. F. Escallón, J. R. 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 de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Agosto, 2010.
- [34] Maria Carmen España Boquera, "Comunicaciones Ópticas Conceptos Esenciales y Ejercicios", Editorial Díaz Santos S.A, 2005.

- [35] R. Randhawaa, J.S. Sohalb, R.S. Kaler, "Pre-, Post and Hybrid Dispersion Mapping Techniques for CSRZ Optical Networks with Nonlinearities", ScienceDirect Optics Communications, Enero, 2009.
- [36] Y. Zhao, "100 G: Opportunities and challenges, and enabling technologies", white paper, Octubre, 2010.
- [37] L. N. Binh, "Optical Fiber Communication Systems", CRC Press, 2009.
- [38] Freescales Semiconductor, "Decision Feedback Equalizer for StarCore®-Based DSPs", Octubre, 2007.
- [39] J. Wang, J. M. Kahn, "Performance of Electrical Equalizers in Optically Amplified OOK and DPSK Systems", IEEE Photonics Technology Letters, Vol 16, No.5, Mayo, 2004.
- [40] L. B. Aporte, "Ecuallizadores y Filtros Transversales Ópticos", Universidad Nacional del Rosario, 2005.
- [41] N. Kikuchi, "Pre-ecualized Optical Transmitter and Pre-ecualized Optical Transmission Systems", white paper, Septiembre, 2009.
- [42] Chi-Shiung Lin "Adaptative Decisión Feedback Ecuallizer", white paper, 2006.
- [43] D. Jhons, "Ecuallization", Universidad de Toronto, 2008.
- [44] E. Gonzales, "Igualladores de Canal para Comunicaiones de Datos", Trabajo de Grado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, Diciembre, 2004.
- [45] W. Chen, "Signal Processing for Optical Performance Monitoring and Impairment Mitigation", Departament of Electrical and Electronic Engineering, The University of Melbourne, Octubre, 2006.
- [46] VPI Photonics design Automation, "Nonlinear Effects in 10Gbit/s DPSK Long-Haul Transmission", VPI Systems, 2011.
- [47] OPNET, "Manual de usuario", septiembre, 2004.
- [48] Roger S. Pressman." Ingeniería del Software, un enfoque práctico". Editorial Mc. Graw Hill, 2002.
- [49] V. M. Miro, "Ecuallizadores Digitales", Universidad Nacional del Rosario, 2009.
- [50] P.M. Watts, V. Mikhailov, S. Savory, P. Bayvel, M. Glick, M. Lobel, B. Christensen, P. Kirkpatrick, S. Shang, R.I. Killey, "Performance Limits of Electronic Feed-Forward and Decision Feedback Equalizers for Single Mode Fibre Links", Optical Networks Group, Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, 2008.
- [51] P. M. Watts, V. Mikhailov, S. Savory, M. Glick, P. Bayvel, R. I. Killey, "Electronic signal processing techniques for compensation of chromatic dispersion", Optical Networks Group, Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, 2009.
- [52] M. S. Alfiad, D. van den Borne, M. Kushnerov, B. Spinnler, T. Wuth, A. Napoli, S. L. Jansen, H. de Waardt, "FFE, DFE and MLSE Equalizers in Phase Modulated Transmission Systems", IEEE Photonics Technology Letters. Enero, 2010.
- [53] Cisco Systems Inc., "Introduction to DWDM for Metropolitan Networks", 2000.
- [54] R. A. Griffin et al., "Optical differential quadrature phase-shift key (oDQPSK) for high capacity optical transmission," in Proc. Opt. Fiber Comm. Conf., 2002.
- [55] I. P. Kaminow, A. E. Willner, "Optical Fiber Telecommunications", Elsevier Inc., 2008.

- [56] S. Zhang, “Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System”, Tesis de Maestría, Universidad de Kansas, 2005.
- [57] OptSim, “User Guide”, RSoft, 2009
- [58] I. M. Polo, “Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies”, Sunrise Telecom®, Octubre, 2009.
- [59] Third Millennium Engineering®, “Fiber Optic Span, Hardware Description Manual”, 2002.
- [60] Corning® Single Mode Optical Fiber, “SMF-28, Hardware Description Manual”, 2003.
- [61] Corning® Optical Fiber, “SMF-28 CPC6, Hardware Description Manual”, 2000.
- [62] Cisco®, “Dispersion Compensator Unit, Hardware Description Manual”, 2007.
- [63] Avantex®, “Modules for Single-Mode Fiber, Hardware Description Manual”, 2005
- [64] Functional Fiber Products®, “Dispersion Compensating Fiber Modules, Hardware Description Manual”, 2000.
- [65] VSISoluciones®, “Aplicaciones en el Medio”, white paper. Página web disponible: [http://vsisoluciones.com.ar/index.php?option=com\\_content&task=view&id=17&Itemid=42](http://vsisoluciones.com.ar/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=42)
- [66] M. B. Lozano, I. Cortez, “WDM, Desarrollo Tecnológico y Expectativas en el Desarrollo de Redes: Análisis por Segmentos”, Marzo, 2006.
- [67] C. Domínguez, M. A. López, G. Martínez, B. Reyes, M. Vázquez, “Simulador Digital”, monografía del Tecnológico de estudios superiores de jocotitlan, 2008.
- [68] A. Toledo, “Practica No.2: Longitud de la Fibra Limitada por la Dispersión”, Material de clase, Sistemas de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca.
- [69] OptSim, “Block Mode, Models Reference”, RSoft, 2009.
- [70] Corning® Pure Form™ SMF DCM®, “Optimal Compensation Dispersion, Hardware Description Manual”, 2000.
- [71] RightWave®, “Dispersion Compensation Module, Hardware Description Manual”, 2003.
- [72] Avantex® Power Shaper™, “Fixed Dispersion Etalon Compensator, Hardware Description Manual”, 2004.
- [73] Corning® Pure Form™ Single-mode Fiber, “DCM Modules for C-Band, Hardware Description Manual”, 2002.
- [74] A. Yin, X. Zhang, “Analysis of modulation format in the 40 Gbit/s optical communication system”, ScienceDirect, Elsevier Inc, Febrero 2009.
- [75] O. Vassilieva, “40Gb/s & 100Gb/s Transport in the WAN”, Fujitsu Laboratories of America, Inc. Richardson, Texas, 2007.
- [76] Marconi®, “MultiHaul 3000, Hardware Description Manual”, 2004.
- [77] ITU-T Rec. G.959.1, “Digital Sections and digital line system – Digital line systems”, Telecommunications Standardization Sector of ITU, marzo, 2008.
- [78] M. Furlong, A. Ghiasi, “Electronic dispersión compensation brings native 10 Gbps to networks”, Broadcom Corp®, Marzo, 2003.
- [79] A. C. Singer, N. R. Shanbhag, H.M. Bae, “Electronic Dispersion Compensation”, IEEE Signal Processing Magazine, Noviembre, 2008.

- [80]** F. Buchali, "Advanced electronic equalization and signal processing for optical communication", Alcatel-Lucent, 2006.
- [81]** H. Bülow, "Electronic equalization of transmission impairments", Optical Fiber Communication (OFC), 2002.
- [82]** T. Lecklider, "A good dose of electronic dispersion compensation will open your eyes to 10 Gb/s Ethernet's possibilities", Evaluation Engineering, Septiembre, 2004.
- [83]** Broadcomp Corporation ®, "Multi-Rate 10 Gbps CDR/Demultiplexer with Electronic Dispersion Compensation", Enero, 2004.
- [84]** A. J. Weiss, "On the performance of electrical equalization in optical fiber transmission systems", IEEE Photonics Technology Letters, Septiembre, 2003.
- [85]** J. F. Bulzacchelli, W. Rhee, M. P. Beakes, L. Shan, D. J. Friedman, "A 10-Gb/s 5-Tap DFE/4-Tap FFE Transceiver in 90-nm CMOS Technology", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol 41, No. 12, Diciembre, 2006.
- [86]** L. F. Alarcón, "Sistemas de Codificación", Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Agosto, 2007.
- [87]** J. C. Fernández, L. Fernández, "Estudio de técnicas de modulación para enlaces ópticos", Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialización en Sistemas de Telecomunicación, Febrero, 2009.
- [88]** D. F. Mendieta, R. H. Milocco, "Técnicas Avanzadas en receptores digitales", Revista Universitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires, Febrero 2006.
- [89]** M. Furlong, A. Ghias, "Increase the Reach on 10 Gbps Optical Links with EDC", EE Times News and Analysis, Octubre, 2005.
- [90]** W. Rosenkranz, C. Xia, "Advanced Electronic Equalization for High-Speed Data Transmission over Multi-Mode as Well as Single-Mode Optical Fiber", Universidad de Kiel, Alemania, 2007.
- [91]** R. I. Killey, P. M. Watts, P. Bayvel, "Electronic precompensation techniques to combat dispersion and nonlinearities in optical transmission", Optical Networks Group, Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, 2009.
- [92]** Agilent Technologies, "N5461A Serial Data Equalization Software for Infiniium Series Oscilloscopes, Hardware Description", 2010.
- [93]** A. Balcioglu, P. Patel, "Using electronic dispersion compensation to equalize reflections in 8 Gb/s Fibre Channel design", EE Times News and Analysis, Octubre, 2010.
- [94]** M. Melgarejo, A. Pirajan, "Filtro FIR Adaptativo sobre Celdas Lógicas Programables FPGA", Universidad Distrital Francisco José de caldas, Facultad de Ingeniería Electrónica, Marzo, 2000.
- [95]** M. Munguía, F. Flores, M. Arias, E. Hernández, "Diseño e Implementación de Ecuiladores Adaptivos Least Mean Square (LMS) y Decision-Feedback Equalizer (DFE) en el Kit de DSP TMS320C6711", White Paper, 2005.
- [96]** L. Wong, R. Rambus, "Hitting the 10-Gbit/s Backplane Mark", EE Times News and Analysis, Agosto, 2004.
- [97]** M. Hagman, T. Kwasniewski, "Two Enhanced Decision Feedback Equalizers for 10Gb/s Optical Communications", IEEE Photonics Technology Letters, 2008.

- [98] L. Wu, L. Chuang, "Electrical Dispersion Compensation (EDC)", White Paper, Agosto, 2006.
- [99] A. Ghiasi, J. Wood, D. Schneider, K. Gass, A. Shanbhag, R. Jambunathan, B. Gomatam, "Electronic Dispersion Compensation for 10 Gb/s, 1550nm Optical Links" Optical Interworking Forum, 2008.
- [100] J. H. Winters, R.D. Gitlin, "Electrical Signal Processing Techniques in Long-Haul Fiber-Optics Systems", IEEE Photonics Technology Letters, Septiembre, 1990.
- [101] F. apablaza, "Fundamentos de Comunicaciones Ópticas", Universidad Católica de Valparaíso, Septiembre, 2010.
- [102] S. Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.
- [103] I. Hernández, "Ecuallizadores, Proceso de Señales en Telecomunicaciones", Universidad del País Vasco, Electrónica y Telecomunicaciones, 2007.
- [104] A. Richter, "Timing Jitter In Long-haul WDM Return-To-Zero Systems", von der Fakultät Elektrotechnik und Informatik der, Technischen Universität Berlin, Febrero 2002.
- [105] M. Kumar , A. K. Sharma, T.S. Kamal, J. S. Malhotra, "Comparative investigation and suitability of various data formats for 10 Gb/s optical soliton transmission links at different chirps", ScienceDirect Optics Communications, Marzo, 2007.
- [106] C. Astudillo, N. Hernández, "Sistemas Ópticos Multicanal", Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, 2009.
- [107] Huawei Technologies Co, "OptiX OSN 3500, Hardware Description", 2005.
- [108] M. Bass, V. Stryland, "Fiber Optics HandBook", Editorial Mc. Graw Hill, 2002.
- [109] ITU-T Rec. G.691, "Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers", Telecommunications Standardization Sector of ITU, marzo, 2006.