

**MITIGACIÓN DEL EFECTO DEL RUIDO EN RECEPCIÓN EN REDES WDM, CON DETECCIÓN
COHERENTE.**



**LUIS FERNANDO ARIAS ROMAN
CARLOS MARIO RESTREPO CRIOLLO**

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

**MITIGACIÓN DEL EFECTO DEL RUIDO EN RECEPCIÓN EN REDES WDM, CON DETECCIÓN
COHERENTE.**

**LUIS FERNANDO ARIAS ROMAN
CARLOS MARIO RESTREPO CRIOLLO**

**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
MAYO de 2011**

*Esta es una etapa más en mi vida,
agradezco muy especialmente a mi madre por
darme su apoyo incondicional, a mi familia
por darme tanta alegría en los momentos difíciles
y a mis amigos con los cuales reí, llore y
luche contra las injusticias de este país.*

Luis Fernando Arias Roman

*Dedico este triunfo a mis padres y toda mi familia,
por brindarme su apoyo durante todos estos años,
a todos mis amigos y compañeros que
me estuvieron a mi lado durante todos estos
años de lucha por un mundo más justo.*

Carlos Mario Restrepo Criollo

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a: Alejandro Toledo Tovar, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones y Director del proyecto, por sus valiosas orientaciones.

A Oscar Calderón, por su colaboración y consejos en este trabajo de grado, y a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte de nuestro camino universitario y que recordaremos con alegría.

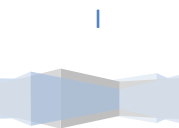
Un agradecimiento especial a Aldo Peruggia - AllOptic Designs, por ser guía y colaborador con la herramienta de simulación OptiSim de Rsoft, para cumplir con éxito los objetivos propuestos.

A los todos nuestros compañeros de la ACEU (Asociación colombiana de estudiantes universitarios), por darnos una formación no solo académica sino que también social, con los cuales aprendimos a valorar y defender la universidad pública.

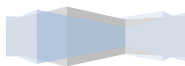
También expresamos un agradecimiento muy especial a nuestras familias, sin las cuales no podríamos terminar esta etapa de nuestras vidas, sobre todo después de tantos años y a todos nuestros amigos por su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN..... | X |
| 1. REDES WDM CON RECEPTORES ÓPTICO COHERENTES..... | 1 |
| 1.1. REDES WDM..... | 1 |
| 1.2. DETECCIÓN COHERENTE Y RECEPTORES..... | 3 |
| 1.2.1. Detección Coherente..... | 4 |
| 1.2.2. Receptores Heterodino..... | 5 |
| 1.3. RUIDOS EN RECEPCIÓN PARA SISTEMAS WDM..... | 10 |
| 1.3.1. Ruidos Lineales..... | 10 |
| 1.3.2. Ruidos no Lineales..... | 12 |
| 1.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL RUIDO EN RECEPCIÓN CUANDO SE UTILIZA DETECCIÓN COHERENTE EN SISTEMAS WDM..... | 13 |
| 1.4.1. Ruido De Fase Del Láser..... | 13 |
| 1.4.2. Ruido Inducido Por Dispersión..... | 15 |
| 1.4.3. Ruido de Fase no Lineal Inducido por Automodulación de Fase SPM..... | 16 |
| 1.4.4. Ruido de Fase no Lineal Inducido por Fase Cruzada XPM..... | 17 |
| 1.4.5. Desempeño en Recepción de Acuerdo con la Modulación..... | 17 |
| 1.5. MODELO SIMPLIFICADO DE RED PARA IDENTIFICAR EL DESEMPEÑO EN RECEPCIÓN DE REDES WDM..... | 18 |
| 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN..... | 23 |
| 2.1. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN..... | 23 |
| 2.1.1. Formulación del Problema..... | 24 |
| 2.1.2. Generación de Escenarios de simulación..... | 24 |
| 2.1.3. Plan de Evaluación y Pruebas..... | 25 |
| 2.2. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN..... | 26 |
| 3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL RUIDO EN REDES WDM CON DETECCIÓN COHERENTE..... | 28 |
| 3.1. FORMATO DE MODULACIÓN NRZ-OOK..... | 28 |
| 3.2. FORMATO DE MODULACIÓN NRZ-DPSK CON RECEPTOR HETERODINO DPSK ASÍNCRONO..... | 35 |
| 3.3. ANÁLISIS DE EFECTOS NO LINEALES..... | 40 |
| 3.3.1. Análisis XPM..... | 40 |
| 3.3.2. Análisis SPM..... | 45 |



| | |
|---|-------------|
| 4. SOLUCIONES PARA MITIGAR EL EFECTO DEL RUIDO EN REDES WDM USANDO DETECCIÓN COHERENTE CON RECEPTORES ÓPTICOS HETERODINOS..... | 49 |
| 4.1. FORMATO DE MODULACIÓN NRZ-OOK CON RECEPTOR HETERODINO ASK ASÍNCRONO..... | 50 |
| 4.1.1. Reducción de la Longitud del Enlace..... | 51 |
| 4.1.2. Supresión del Enlace de 32 Canales e Implementación de un Enlace de 4 Canales..... | 54 |
| 4.2. FORMATO DE MODULACIÓN NRZ-DPSK CON RECEPTOR HETERODINO DPSK ASÍNCRONO..... | 55 |
| 4.2.1. Reducción de la Longitud del Enlace..... | 56 |
| 4.2.2. Supresión del Enlace de 32 Canales e Implementación de un Enlace de 4 Canales..... | 59 |
| 4.3. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SPM..... | 61 |
| 4.3.1. SPM en NRZ-OOK..... | 61 |
| 4.3.2. SPM en NRZ-DPSK..... | 62 |
| 4.4. EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA POTENCIA DEL OSCILADOR LOCAL..... | 63 |
| 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... | 66 |
| 5.1. CONCLUSIONES GENERALES..... | 66 |
| 5.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS..... | 66 |
| 5.3. TRABAJOS FUTURO..... | 68 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 69 |
| INDICE DE FIGURAS..... | III |
| INDICE DE TABLAS..... | VI |
| ACRONIMOS..... | VIII |



INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

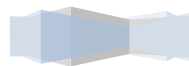
| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 1.1. | WDM Vs. DWDM..... | 1 |
| Figura 1.2. | Esquema general red WDM..... | 3 |
| Figura 1.3. | Receptor de rama simple..... | 6 |
| Figura 1.4. | Receptor balanceado..... | 7 |
| Figura 1.5. | Receptor heterodino ASK asíncrono..... | 8 |
| Figura 1.6. | Receptor heterodino FSK asíncrono..... | 8 |
| Figura 1.7. | Receptor heterodino DPSK asincrono..... | 8 |
| Figura 1.8. | Curvas del BER para receptores heterodinos síncronos y asíncronos.. | 9 |
| Figura 1.9. | OSNR con ruido de fase del láser en DPSK..... | 15 |
| Figura.1.10. | Modelo simplificado de red..... | 19 |

CAPITULO II

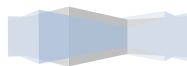
| | | |
|-------------|--|----|
| Figura.2.1. | Diagrama de flujo para el entorno de simulación..... | 26 |
|-------------|--|----|

CAPITULO III

| | | |
|----------------|--|----|
| Figura.3.1. | Configuración 2 con 16 canales..... | 26 |
| Figura.3.2.(a) | Sistema NRZ con 8 canales, 7 Span y compensación del 70% de la CD..... | 26 |
| Figura.3.2.(b) | Sistema NRZ con 8 canales, 7 Span Compensación del 100% de la CD..... | 26 |
| Figura.3.3.(a) | Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 7 span de 80km..... | 30 |
| Figura.3.3.(b) | Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 6 span de 90km..... | 30 |
| Figura.3.3.(c) | Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 5 span de 100Km..... | 30 |
| Figura.3.4.(a) | Sistema NRZ-OOK con 16 canales y 7 span de 80km..... | 31 |
| Figura.3.4.(b) | Sistema NRZ-OOK con 16 canales y 6 span de 90km..... | 31 |
| Figura.3.4.(c) | Sistema NRZ-OOK con 16 canales y 5 span de 100Km..... | 31 |
| Figura.3.5.(a) | Sistema NRZ-OOK con 32 canales y 7 span de 80km..... | 32 |
| Figura.3.5.(b) | Sistema NRZ-OOK con 32 canales y 6 span de 90km..... | 32 |
| Figura.3.5.(c) | Sistema NRZ-OOK con 32 canales y 5 span de 100km..... | 32 |
| Figura.3.6. | Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 5 Span de 100 Km..... | 32 |
| Figura.3.7.(a) | Sistema NRZ-OOK con 7 Span de 80 Km y 8 canales..... | 33 |
| Figura.3.7.(b) | Sistema NRZ-OOK con 7 Span de 80 Km y 16 canales..... | 33 |
| Figura.3.7.(c) | Sistema NRZ-OOK con 7 Span de 80 Km y 32 canales..... | 33 |
| Figura.3.8.(a) | Sistema NRZ-OOK con 6 Span de 90 Km y 8 canales..... | 33 |
| Figura.3.8.(b) | Sistema NRZ-OOK con 6 Span de 90 Km y 16 canale..... | 33 |
| Figura.3.8.(c) | Sistema NRZ-OOK con 6 Span de 90 Km y 32 canales..... | 33 |
| Figura.3.9.(a) | Sistema NRZ-OOK con 5 Span de 100 Km y 8 canales..... | 33 |
| Figura.3.9.(b) | Sistema NRZ-OOK con 5 Span de 100 Km y 16 canales..... | 33 |
| Figura.3.9.(c) | Sistema NRZ-OOK con 5 Span de 100 Km y 32 canales..... | 33 |



| | |
|---|----|
| Figura.3.10.(a) Sistema NRZ DPSK con 8 canales, 7 Span y compensación del 70% de la CD..... | 35 |
| Figura.3.10.(b) Sistema NRZ DPSK con 8 canales, 7 Span Compensación del 100% de la CD..... | 35 |
| Figura.3.11.(a) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y 7 span de 80km..... | 36 |
| Figura.3.11.(b) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y 6 span de 90km..... | 36 |
| Figura.3.11.(c) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y 5 span de 100Km..... | 36 |
| Figura.3.12.(a) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y 7 span de 80km..... | 36 |
| Figura.3.12.(b) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y 6 span de 90km..... | 36 |
| Figura.3.12.(c) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y 5 span de 100Km..... | 36 |
| Figura.3.13.(a) Sistema NRZ-DPSK con 32 canales y 7 span de 80km..... | 37 |
| Figura.3.13.(b) Sistema NRZ-DPSK con 32 canales y 6 span de 90km..... | 37 |
| Figura.3.13.(c) Sistema NRZ-DPSK con 32 canales y 5 span de 100Km..... | 37 |
| Figura.3.14.(a) Sistema NRZ-DPSK con 7 span de 80km y 8 canales..... | 38 |
| Figura.3.14.(b) Sistema NRZ-DPSK con 7 span de 80km y 16 canales..... | 38 |
| Figura.3.14.(c) Sistema NRZ-DPSK con 7 span de 80km y 32 canales..... | 38 |
| Figura.3.15.(a) Sistema NRZ-DPSK con 6 Span de 90 Km y 8 canales..... | 38 |
| Figura.3.15.(b) Sistema NRZ-DPSK con 6 Span de 90 Km y 16 canales..... | 38 |
| Figura.3.15.(c) Sistema NRZ-DPSK con 6 Span de 90 Km y 32 canales..... | 38 |
| Figura.3.16.(a) Sistema NRZ-DPSK con 5 Span de 100 Km y 8 canales..... | 39 |
| Figura.3.16.(b) Sistema NRZ-DPSK con 5 Span de 100 Km y 16 canales..... | 39 |
| Figura.3.16.(c) Sistema NRZ-DPSK con 5 Span de 100 Km y 32 canales..... | 39 |
| Figura 3.17 Señal de transmitida 16 canales NRZ-OOK y potencias de 0 dBm y 10dBm..... | 41 |
| Figura 3.18 Señal a 80 Km con 16 canales NRZ-OOK y potencias de 0 dBm y 10 dBm..... | 41 |
| Figura 3.19 Señal NRZ-OOK demultiplexada, antes de entrar al receptor..... | 41 |
| Figura 3.20 Señal demultiplexada después de pasar por el receptor coherente.... | 42 |
| Figura 3.21.(a) Diagrama del ojo para NRZ-OOK de 16 canales con 0 DC..... | 42 |
| Figura 3.21.(b) Diagrama del ojo para NRZ-OOK de 16 canales con 17 DC..... | 42 |
| Figura 3.22 Señal de transmitida 16 canales NRZ-DPSK y potencias intercaladas | 43 |
| Figura 3.23 Señal a 80Km con 16 canales NRZ-DPSK y potencias intercaladas.... | 43 |
| Figura 3.24 Señal NRZ-DPSK demultiplexada, antes de entrar al receptor coherente..... | 44 |
| Figura 3.25 Señal demultiplexada NRZ-DPSK, después de pasar por el receptor coherente..... | 44 |
| Figura 3.26.(a) Diagrama del ojo para NRZ-DPSK de 16 canales con 0 DC..... | 44 |
| Figura 3.26.(b) Diagrama del ojo para NRZ-DPSK de 16 canales con 17 DC..... | 44 |
| Figura 3.27.(a) Sistema de 16 canales NRZ-OOK de un span de 80 km con ganancia de amplificador EDFA de 0 dB..... | 45 |
| Figura 3.27.(b) Sistema de 16 canales NRZ-OOK de un span de 80 km con ganancia de amplificador EDFA de 10 dB..... | 45 |
| Figura 3.28.(a) Sistema NRZ-OOK con 8 canales y un span de 80km, con dispersion de la fibra de -10 ps/nm*Km..... | 46 |
| Figura 3.28.(b) Sistema NRZ-OOK con 8 canales y un span de 80km, con dispersion de la fibra de 0 ps/nm*Km..... | 46 |
| Figura 3.28.(c) Sistema NRZ-OOK con 8 canales y un span de 80km, con dispersion de la fibra de 10 ps/nm*Km..... | 46 |
| Figura 3.29.(a) Sistema de 16 canales NRZ-DPSK de un span de 80 km con | |



| | |
|--|----|
| ganancia de amplificador EDFA de 0 dB..... | 47 |
| Figura 3.29.(b) Sistema de 16 canales NRZ-DPSK de un span de 80 km con ganancia de amplificador EDFA de 10 dB..... | 47 |
| Figura 3.30.(a) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y un span de 80km, con dispersion de la fibra de -10 ps/nm*Km..... | 47 |
| Figura 3.30.(b) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y un span de 80km, con dispersion de la fibra de 0 ps/nm*Km..... | 47 |
| Figura 3.30.(c) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y un span de 80km, con dispersion de la fibra de 10 ps/nm*Km..... | 47 |

CAPITULO IV

| | |
|---|----|
| Figura 4.1.(a) Sistema NRZ-OOK con 4 canales, 6 Span de 60 km y compensación del 70% de la CD..... | 50 |
| Figura.4.1.(b) Sistema NRZ-OOK con 4 canales, 6 Span de 60 Km y compensación del 100% de la CD..... | 50 |
| Figura 4.2.(a) Sistema NRZ-OOK con 4 canales y 6 span de 60km..... | 51 |
| Figura 4.2.(b) Sistema NRZ-OOK con 4 canales y 5 span de 70km..... | 51 |
| Figura 4.2.(c) Sistema NRZ-OOK con 4 canales y 4 span de 80Km..... | 51 |
| Figura 4.3.(a) Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 6 span de 60km..... | 52 |
| Figura 4.3.(b) Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 5 span de 70km..... | 52 |
| Figura 4.3.(c) Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 4 span de 80Km..... | 52 |
| Figura 4.4.(a) Sistema NRZ-OOK con 16 canales y 6 span de 60km..... | 52 |
| Figura 4.4.(b) Sistema NRZ-OOK con 16 canales y 5 span de 70km..... | 52 |
| Figura 4.4.(c) Sistema NRZ-OOK con 16 canales y 4 span de 80Km..... | 52 |
| Figura 4.5 Sistema NRZ-OOK de 16 canales con 4 span de 80Km..... | 53 |
| Figura 4.6.(a) Sistema NRZ-OOK de 6 span de 60km con 4 canales..... | 54 |
| Figura 4.6.(b) Sistema NRZ-OOK de 6 span de 60km con 8 canales..... | 54 |
| Figura 4.6.(c) Sistema NRZ-OOK de 6 span de 60km con 16 canales..... | 54 |
| Figura 4.7.(a) Sistema NRZ-OOK de 5 span de 70km con 4 canales..... | 54 |
| Figura 4.7.(b) Sistema NRZ-OOK de 5 span de 70km con 8 canales..... | 54 |
| Figura 4.7.(c) Sistema NRZ-OOK de 5 span de 70km con 16 canales..... | 54 |
| Figura 4.8.(a) Sistema NRZ-OOK de 4 span de 80km con 4 canales..... | 55 |
| Figura 4.8.(b) Sistema NRZ-OOK de 4 span de 80km con 8 canales..... | 55 |
| Figura 4.8.(c) Sistema NRZ-OOK de 4 span de 80km con 16 canales..... | 55 |
| Figura.4.9.(a) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales, 5 Span y compensación del 70% de la CD..... | 55 |
| Figura.4.9.(b) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales, 5 Span Compensación del 100% de la CD..... | 55 |
| Figura 4.10.(a) Sistema NRZ-DPSK con 4 canales y 6 span de 60km..... | 56 |
| Figura 4.10.(b) Sistema NRZ-DPSK con 4 canales y 5 span de 70km..... | 56 |
| Figura 4.10.(c) Sistema NRZ-DPSK con 4 canales y 4 span de 80Km..... | 56 |
| Figura 4.11.(a) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y 6 span de 60km..... | 57 |
| Figura 4.11.(b) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y 5 span de 70km..... | 57 |
| Figura 4.11.(c) Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y 4 span de 80Km..... | 57 |
| Figura 4.12.(a) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y 6 span de 60km..... | 58 |
| Figura 4.12.(b) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y 5 span de 70km..... | 58 |
| Figura 4.12.(c) Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y 4 span de 80Km..... | 58 |
| Figura 4.13.(a) Sistema NRZ-DPSK de 6 span de 60km con 4 canales..... | 59 |



| | |
|---|----|
| Figura 4.13.(b) Sistema NRZ-DPSK de 6 span de 60km con 8 canales..... | 59 |
| Figura 4.13.(c) Sistema NRZ-DPSK de 6 span de 60km con 16 canales..... | 59 |
| Figura 4.14.(a) Sistema NRZ-DPSK de 5 span de 70km con 4 canales..... | 59 |
| Figura 4.14.(b) Sistema NRZ-DPSK de 5 span de 70km con 8 canales..... | 59 |
| Figura 4.14.(c) Sistema NRZ-DPSK de 5 span de 70km con 16 canales..... | 59 |
| Figura 4.15.(a) Sistema NRZ-DPSK de 4 span de 80km con 4 canales..... | 60 |
| Figura 4.15.(b) Sistema NRZ-DPSK de 4 span de 80km con 8 canales..... | 60 |
| Figura 4.15.(c) Sistema NRZ-DPSK de 4 span de 80km con 16 canales..... | 60 |
| Figura 4.16.(a) Sistema de 4 canales NRZ-OOK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de 0 dBm..... | 61 |
| Figura 4.16.(b) Sistema de 4 canales NRZ-OOK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de 9 dBm..... | 61 |
| Figura 4.16.(c) Sistema de 4 canales NRZ-OOK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de 2 dBm..... | 61 |
| Figura 4.17.(a) Sistema de 4 canales NRZ-DPSK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de 0 dBm..... | 62 |
| Figura 4.17.(b) Sistema de 4 canales NRZ-DPSK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de 9 dBm..... | 62 |
| Figura 4.17.(c) Sistema de 4 canales NRZ-DPSK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de 2 dBm..... | 62 |

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO I

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabla 1.1 | Características generales de las redes WDM..... | 2 |
| Tabla 1.2 | Comparación del desempeño de varios tipos de receptores..... | 9 |
| Tabla 1.3 | Características modelo simplificado de red..... | 21 |

CAPITULO II

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 2.1 | Parámetros de los escenarios de simulación..... | 25 |
|------------|---|----|

CAPITULO III

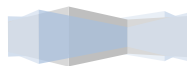
| | | |
|-----------|---|----|
| Tabla 3.1 | Resultados de la variación de Span en enlace de 8 canales, con una compensación del 100%..... | 30 |
| Tabla 3.2 | Resultados de la variación de Span en enlace de 16 canales..... | 31 |
| Tabla 3.3 | Resultados de la variación de Span en enlace de 32 canales..... | 32 |
| Tabla 3.4 | Resultados de la variación de Span en enlace de 8 canales..... | 36 |



| | | |
|------------|---|----|
| Tabla 3.5 | Resultados de la variación de Span en enlace de 16 canales..... | 37 |
| Tabla 3.6 | Resultados de la variación de Span en enlace de 8 canales..... | 37 |
| Tabla 3.7 | Resultados de la variación de la dispersión cromática de la fibra, en un enlace NRZ-OOK de 16 canales..... | 42 |
| Tabla 3.8 | Resultados de la variación de la dispersión cromática de la fibra, en un enlace NRZ-DPSK de 16 canales..... | 45 |
| Tabla 3.9 | Resultados de la variación de la ganancia del EDFA en un enlace de 16 canales con 1 span de 80 km..... | 46 |
| Tabla 3.10 | Resultados de la variación de la dispersión en enlace de 16 canales con 1 span de 80 km..... | 46 |
| Tabla 3.11 | Resultados de la variación de la ganancia del EDFA en un enlace de 16 canales con 1 span de 80 km..... | 47 |
| Tabla 3.12 | Resultados de la variación de la dispersión en enlace NRZ-DPSK de 16 canales con 1 span de 80 km..... | 48 |

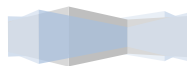
CAPITULO IV

| | | |
|------------|---|----|
| Tabla 4.1 | Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-OOK con 4 canales, y compensación del 100%..... | 51 |
| Tabla 4.2 | Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-OOK con 8 canales, y compensación del 100%..... | 52 |
| Tabla 4.3 | Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-OOK con 16 canales, y compensación del 100%..... | 53 |
| Tabla 4.4 | Resultados de la variación de span en enlace NRZ-DPSK con 4 canales, y compensación del 100%..... | 56 |
| Tabla 4.5 | Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-DPSK con 8 canales, y compensación del 100%..... | 57 |
| Tabla 4.6 | Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-DPSK con 16 canales, y compensación del 100%..... | 58 |
| Tabla 4.8 | Resultados de la variación de la potencia del amplificador EDFA en un enlace NRZ-OOK de 70 km..... | 62 |
| Tabla 4.9 | Resultados de la variación de la potencia del amplificador EDFA para un enlace NRZ-DPSK de 70 km..... | 63 |
| Tabla 4.10 | Resultados de la variación de la potencia del oscilador local para un enlace NRZ-OOK de 70 km..... | 64 |
| Tabla 4.11 | Resultados de la variación de la potencia del oscilador local para un enlace NRZ-DPSK de 70 km..... | 64 |

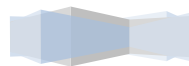


ACRÓNIMOS

| | |
|--------|---|
| ACRZ: | Chirp Alternante con Retorno a Cero (Alternate-Chirp Return to Zero) |
| ASE: | Emisiones Espontáneas Amplificadas (Amplified Spontaneous Emission) |
| BER: | Tasa de Error de Bit (Bit Error Rate) |
| CD: | Dispersión Cromática (Chromatic Dispersion) |
| CRZ: | Retorno a Cero con Chirp (Chirped Return to Zero) |
| C-NRZ: | No retorno a Cero con Chirp (Chirped Nonreturn to Zero) |
| CSRZ: | Retorno a Cero con Supresor de Portadora (Carrier-Suppressed Return to Zero) |
| CWDM: | Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada (Coarse Wavelength División Multiplexing) |
| D: | Dispersión (Dispersion) |
| DB: | Duobinario (Duobinary) |
| DCF: | Fibra Compensadora de Dispersión (Dispersion-Compensating Fiber) |
| DGD: | Retardo de Grupo Diferencial (Differential Group Delay) |
| DPSK: | Modulación por desplazamiento de fase diferencial (Differential Phase Shift Keying) |
| DQPSK: | Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial (Differential Quadrature Phase Shift Keying) |
| DS: | Dispersión Residual (Dispersion Slope) |
| DST: | Transmisión de Dispersión Soportada (Dispersion-Supported Transmission) |
| DWDM: | Multiplexación por División de Longitud de Onda Densamente Espaciada (Dense Wavelength División Multiplexing) |
| EDFA: | Amplificador de Fibra Dopada de Erblio (Erbium Doped Fiber Amplifier) |
| ESNR: | Relación Señal a Ruido Eléctrico (Electrical Signal to Noise Ratio) |
| FWHM: | Ruido de fase del láser (Full Width at Half Maximum) |
| FWM: | Mezcla de Cuatro Ondas (Four-Wave Mixing) |
| GVD: | Dispersión de Velocidad Grupal (Group Velocity Dispersion) |
| IFWM: | Mezcla Intracanal de Cuatro Ondas (Intrachannel Four-Wave Mixing) |
| IP: | Protocolo de Internet (Internet Protocol) |
| ITU-T: | Unión Internacional de Telecomunicaciones – Telecomunicaciones (International Telecommunication Union) |
| IXPM: | Modulación Intracanal de Fase Cruzada (Intrachannel Cross-Phase Modulation) |
| LAN: | Red de Área Local (Local Area Network) |
| MAN: | Red de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network) |
| M-ASK: | Modulación por desplazamiento de Amplitud Multinivel (Multinivel Amplitud Shift Keying) |
| MI: | Inestabilidad de Modulación (Modulation Instability) |
| MZIM: | Modulador Mach-Zenhder Interferométrico (Mach-Zenhder Interferometric Modulator) |
| MZM: | Modulador Mach-Zenhder (Mach-Zenhder Modulator) |
| NRZ: | No Retorno a Cero (Nonreturn to Zero) |
| OA: | Amplificador Óptico (Optical Amplifier) |
| OOK: | Llaveo de encendido apagado (On-Off Keying) |



| | |
|---------------|--|
| <i>OSNR:</i> | <i>Relación Señal a Ruido Óptico (Optical Signal to Noise Ratio)</i> |
| <i>PASS:</i> | <i>Señalización por Desplazamiento de Amplitud-Fase (Phased Amplitud Shift Signaling)</i> |
| <i>PDH:</i> | <i>Jerarquía Digital Plesiócrona (Plesiochronous Digital Hierarchy)</i> |
| <i>PMD:</i> | <i>Dispersión por Modo de Polarización (Polarization Mode Dispersion)</i> |
| <i>PSBT:</i> | <i>Transmisión Binaria Fase-Formada (Phase-Shaped Binary Transmission)</i> |
| <i>PSP:</i> | <i>Estado Principal de Polarización (Principal State of Polarization)</i> |
| <i>QPSK:</i> | <i>Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying)</i> |
| <i>RZ:</i> | <i>Retorno a cero (Return to Zero)</i> |
| <i>SBS:</i> | <i>Dispersión Estimulada de Brillouin (Stimulated Brillouin-Scattering)</i> |
| <i>SDH:</i> | <i>Jerarquía Digital Síncrona (Synchronous Digital Hierarchy)</i> |
| <i>SONET:</i> | <i>Redes Ópticas Síncronas (Synchronous Optical Network)</i> |
| <i>SPM:</i> | <i>Automodulación de Fase (Self-Phase Modulation)</i> |
| <i>SPT:</i> | <i>Técnica de Propagación Espectral (Spectral Propagation Technique)</i> |
| <i>SRS:</i> | <i>Dispersión Estimulada de Ramman (Stimulated Ramman-Scattering)</i> |
| <i>SSB:</i> | <i>Banda Lateral Única (Single Sideband)</i> |
| <i>SSMF:</i> | <i>Estándar de Fibra Monomodo (Standard Single-Mode Fiber)</i> |
| <i>STM:</i> | <i>Módulo de Transporte Síncrono (Synchronous Transport Module)</i> |
| <i>VBS:</i> | <i>Técnica de Ancho de Banda Variable (Variable Bandwidth Simulation Technique)</i> |
| <i>VSF:</i> | <i>Banda Lateral Residual (Vestigial Sideband)</i> |
| <i>WAN:</i> | <i>Red de Área Amplia (Wide Area Network)</i> |
| <i>WDM:</i> | <i>Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength División Multiplexing)</i> |
| <i>XPM:</i> | <i>Modulación de Fase Cruzada (Cross-Phase Modulation)</i> |
| <i>XPoIM:</i> | <i>Modulación de Cross Polarización (Cross-Polarization Modulation)</i> |



Tras la aparición de la fibra óptica en el mundo de las telecomunicaciones, desde los años 70s, ésta ha tenido un proceso evolutivo de gran trascendencia que la ha convertido en uno de los principales medios de transmisión para largas distancias y altas velocidades. Este proceso evolutivo consta de 5 generaciones diferentes de la fibra [1], en la cual se fue mejorando gradualmente el rendimiento, expresado en una tasa de errores de bit cada vez más baja.

Hasta la cuarta generación de la fibra, se utilizó la detección directa [1], que consiste en tomar los fotones del láser incidente en recepción y transformarlos en energía eléctrica, a través de fotodiodos y sin el uso de ningún tipo de señal externa. La detección directa tiene como característica el uso de un esquema de modulación conocido como Modulación de Intensidad (Intensity Modulation) que, como su nombre lo indica, transporta la información a través de la variación de la intensidad de la portadora¹.

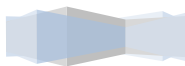
El problema de la cuarta generación con respecto a las anteriores es que, al trabajar con longitudes onda en la ventana de los 1500nm, se aumentó considerablemente la dispersión cromática [1], haciendo que fuera necesario desarrollar técnicas que compensaran esta dispersión y mejoraran el rendimiento.

En la quinta generación, a finales de los 80s y principios de los 90s, apareció la detección coherente como nueva técnica de recepción, que consiste en combinar la señal óptica incidente con una señal producida por un oscilador local a determinada frecuencia. La detección coherente presentó una mejora considerable en la sensibilidad en recepción, es decir, se necesitaba una cantidad significativamente menor de fotones por bit para reducir la BER a 10^{-9} , logrando una reducción de más de 25 dB en la potencia de transmisión necesaria para obtener este rendimiento. Sin embargo, la aparición de los EDFAs² a comienzos de los 90s, significó una mejora del desempeño casi en la misma proporción que los receptores ópticos coherentes que, por su parte, se caracterizaban por su gran complejidad de implementación. Como consecuencia éstos últimos perdieron relevancia y las investigaciones en materia de detección coherente se dejaron a un lado por casi dos décadas [2].

A pesar de todo esto, se ha retomado el estudio del tema debido a la necesidad del uso de esquemas de modulación de fase, para los cuales se utiliza este tipo de detección. Dichos esquemas permiten transportar la información usando la fase de la portadora, lo cual genera la posibilidad de aumentar el número de canales y tener un uso más eficiente del espectro [2]. Sin embargo, apareció en escena un problema propio de la modulación de fase que no presentaba la modulación de intensidad, que es la presencia del ruido de fase no lineal. A inicios de este milenio, se trató este ruido como el mayor obstáculo para

¹ Sólo en el 2002 se realizaron ciertos trabajos en los cuales se experimentaron sistemas de modulación de fase con detección directa [7], los cuales se salen de los límites de nuestra materia de investigación

² EDFA: Amplificador de Fibra Dopada con Erblio. Amplifica las señales ópticas a través de la emisión de fotones desde los iones de Erblio dopados en la fibra, los cuales son estimulados por la luz de la señal



compensar la dispersión ([3] y [4]), hasta que en el 2002 se elaboraron trabajos que demostraron que este ruido estaba correlacionado con la intensidad recibida, y por tanto, se podía compensar con la misma, usando circuitos electrónicos ([5] y [6]).

Otra característica de la detección coherente es que el uso de receptores homodinos genera un mejor desempeño en recepción, pero su implementación es mucho más compleja y costosa. Por otro lado, los receptores heterodinos son más comunes a nivel comercial, porque su implementación es menos compleja y la diferencia en desempeño no es tan significativa. Por estas razones, este proyecto se centrará en el estudio de receptores ópticos heterodinos.

Las investigaciones sobre detección coherente se enfocan en analizar, por separado, el efecto³ de cada tipo de ruido presente en sistemas modulados en fase. Esto ha servido para resolver problemas en sistemas dominados por determinado tipo de ruido, pero muy pocas veces se tienen en cuenta sistemas sometidos a diferentes tipos de ruido, ni los métodos necesarios para mitigar⁴ el efecto que generan actuando al mismo tiempo. Es importante si existe un compromiso entre ruidos, que podrían presentarse en estos sistemas, para que de esta forma se pueda controlar la degradación de la señal recibida de forma más efectiva.

Es por esto que el objetivo de este trabajo es responder las siguientes preguntas: ¿Cuál es el efecto que genera la presencia de diversos tipos de ruido actuando al mismo tiempo sobre una red WDM que utiliza detección coherente con receptores ópticos heterodinos? ¿Cuáles podrían ser las posibles soluciones para mitigar dicho efecto? A través de resultados de simulación sobre redes WDM bajo ciertas características, se responden estas preguntas bajo un contexto específico, en el cual se pueden generalizar ciertas tendencias del comportamiento de las señales frente al ruido cuando se utiliza el receptor heterodino.

Con el fin de abordar los temas requeridos para el desarrollo del trabajo de grado, el contenido se divide en cinco capítulos de la siguiente manera:

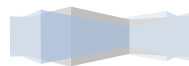
Capítulo 1. Redes WDM con receptores óptico coherentes.

En este capítulo se hace un análisis detallado de los ruidos que tienen mayor relevancia en redes WDM con receptores coherentes heterodinos. Al final se propone un modelo simplificado de red con unas características específicas.

Capítulo 2. Metodología y Escenarios de Simulación.

³ En todo este trabajo de investigación se asocia el concepto “efecto del ruido” con la degradación de la señal en el nivel físico (deformación de los bits, pérdida de bits, Interferencia Inter-simbólica, etc.)

⁴ En el presente trabajo el concepto “mitigar el efecto del ruido” se refiere a disminuir o reducir la degradación de la señal en el nivel físico.



En este capítulo se define los escenarios de simulación, basados en el modelo simplificado de red, con el fin de analizar el desempeño frente al ruido de los receptores ópticos coherentes heterodinos en redes WDM, receptores que fueron abordados en el capítulo 1, además de definir la herramienta de simulación utilizada.

Capítulo 3. Evaluación del Efecto del Ruido en Redes WDM con Detección Coherente.

Las actividades a desarrollar en este capítulo se enfocan en evaluar, mediante la herramienta de simulación, el efecto de los ruidos lineales y no lineales, en la recepción de redes WDM, cuando se utiliza detección coherente con receptores ópticos heterodinos.

Capítulo 4. Soluciones para Mitigar el Efecto del Ruido en Redes WDM Usando Detección Coherente con Receptores Ópticos Heterodinos

En este capítulo se plantean modificaciones al enlace para mitigar los ruidos planteados anteriormente.

Capítulo 5. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros.

Contiene conclusiones generales con respecto a la realización del trabajo de grado, y a los resultados obtenidos. Así mismo, algunas recomendaciones con respecto al entorno de simulación y a la ejecución del proyecto y por último brindan ideas sobre posibles trabajos futuros.



CAPITULO 1. REDES WDM CON RECEPTORES ÓPTICOS COHERENTES

En este capítulo se analiza el efecto del ruido sobre las redes WDM teniendo en cuenta las investigaciones realizadas hasta el momento a nivel nacional e internacional. Para ésto se inicia con una síntesis teórica de conceptos sobre redes WDM, las clases y características más importantes de los receptores ópticos coherentes, en especial de los receptores heterodinos, y los tipos de ruidos que afectan las comunicaciones ópticas; se hace un análisis detallado de los ruidos que tienen mayor relevancia en redes WDM con receptores coherentes heterodinos. Finalmente se propone un modelo simplificado de red con unas características específicas que, a partir de la síntesis teórica realizada, permitan ver los efectos del ruido en dicha red cuando se implemente a través de su simulación en los capítulos siguientes.

1.1 REDES WDM

Las redes WDM (Wavelength División Multiplexing) a lo largo de los últimos años han sido objeto de constantes estudios y desarrollo de servicios relacionado con las telecomunicaciones, por lo que hoy en día se puede decir que WDM ha incrementado la capacidad de la fibra.

WDM aprovecha la naturaleza física de la luz multiplexando las señales ópticas de diferentes fuentes. Además tiene la capacidad de implementar diferentes velocidades de transmisión de datos y diferentes protocolos sobre una misma fibra. Esta tecnología se encuentra estandarizada en las recomendaciones de la ITU-T G.694.1 [8] y G.695 [9].

Las sistemas WDM se clasifican en dos tipos: DWDM (WDM Densamente Espaciados) que se caracteriza por la pequeña separación entre sus canales ($\sim 0,4$; $\sim 0,8$; $\sim 1,6$ nm en la ventana C, L, S) y CWDM (WDM Ampliamente Espaciados) se caracteriza por una mayor separación de sus canales (20nm en las ventanas O, E, S, C,L), los cuales se definen en los estándares de la ITU-T [8] y [9].

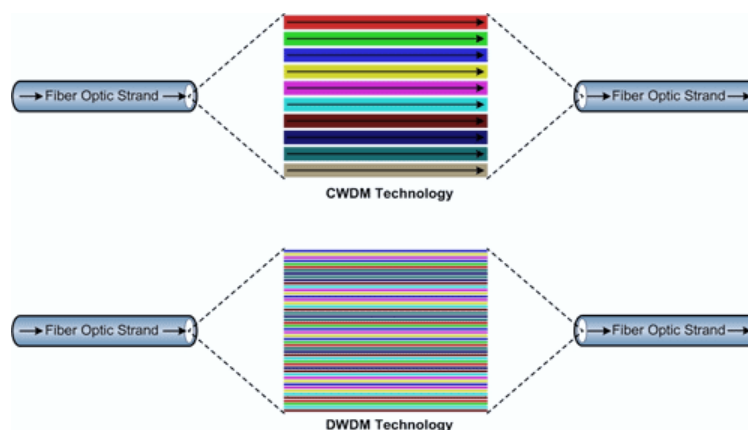


Figura 1.1 CWDM vs DWDM [10]

La recomendación ITU-T [8] define las características de redes DWDM, entre las cuales se encuentra la utilización de ventanas desde los 1525nm hasta los 1565nm. Una de las características más importantes es la de introducir más longitudes de onda en la fibra, gracias a que la separación entre sus canales es relativamente pequeña (0.4nm, 0.8nm y 1.6nm) a comparación de CWDM. Esta reducción de la separación de las ventanas y el aumento de longitudes de onda transportadas, ocasiona fenómenos como el cross-talk, efectos no lineales en la fibra, entre otros efectos que degradan la señal.

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

Tabla 1.1 Características generales de las redes WDM [11]

Entre las características más importantes de las redes WDM están ([12], [13] y [14]):

- Entre más pequeña es la distancia entre los canales, más difícil y costoso es separarlos en el demultiplexor y simultáneamente alcanzar un adecuado aislamiento de canal adyacente y bajas pérdidas por inserción.
- Entre más pequeña es la distancia entre los canales, más estabilidad en frecuencia se requiere de los transmisores.
- Entre más señales comparten una fibra, menor será la potencia requerida por cada longitud de onda debido a la interacción mutua producida por las propiedades no lineales de la fibra.
- Los amplificadores EDFA (Amplificadores de Fibra Dopada de Erblio), funcionan muy bien en la banda C, entre 1530nm a 1560nm, en sistemas DWDM con separación de 0.8nm², en los cuales se pueden implementar 40 canales WDM. Para más información sobre estos sistemas, la distribución de sus canales, etc. consultar el anexo A.
- Una característica particular de los sistemas con Modulación de Intensidad y Detección Directa IM/DD es su baja selectividad de canal, razón por la cual dependen totalmente de los demultiplexores para la separación de los canales. Estos deben tener un fuerte rechazo del “crosstalk” para canales adyacentes, al tiempo que no pueden distorsionar la señal, por lo cual sus requerimientos de diseño son muy exigentes. Por otro lado, en sistemas con Detección Coherente, el láser del Oscilador Local selecciona el canal WDM a demodular, reduciendo la tarea de los demultiplexores al disminuir las pérdidas, funcionando como un separador pasivo. El rechazo al “crosstalk” por parte del demultiplexor no es esencial, pero si es importante

utilizarlo. Además la demultiplexación impide que una gran cantidad de canales WDM utilicen el fotodiodo y lo sobrecarguen.

WDM tiene la capacidad de combinar múltiples señales ópticas con distintas velocidades (STM-1/OC-3 a STM-16/OC-48, o incluso STM-64/OC) y distintos formatos (ATM, Frame Relay, etc), para formar un grupo y transmitirlo en una única fibra. Además gracias a la alta potencia de los amplificadores DWDM y a su bajo nivel de ruido, se pueden alcanzar distancias de hasta 600 Km sin repetidores para 2.5 Gbits/s y 32 canales independientes [15].

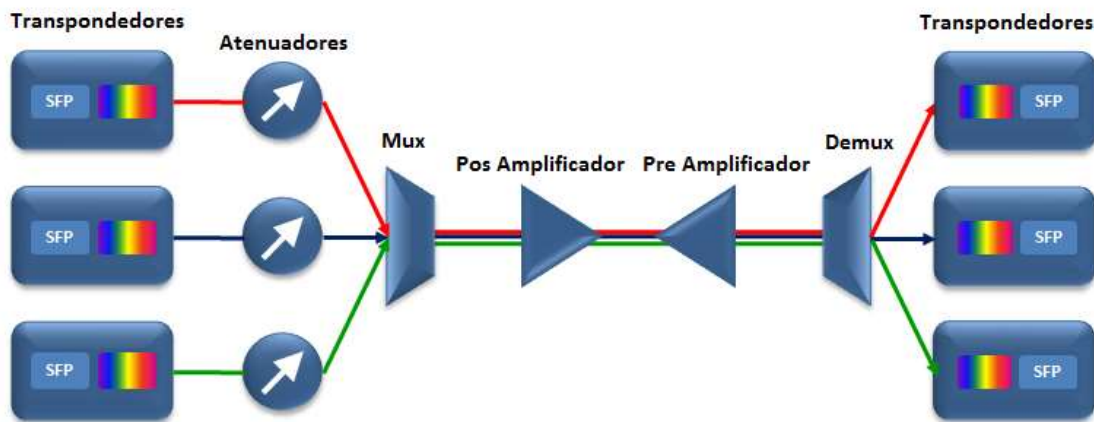


Figura 1.2 Esquema General Red WDM [16]

Un sistema WDM consiste, a grandes rasgos, en un transmisor WDM, una serie de segmentos de fibra y un receptor WDM como se muestra en la figura 1.2. El transmisor WDM está formado por láseres de diferentes longitudes de onda, que son multiplexados, amplificados y transmitidos por el enlace de fibra. Este enlace está formado por una secuencia de segmentos (span), donde cada segmento mide entre 80Km y 120Km dependiendo del tipo de atenuación de la fibra óptica utilizada.

1.2 DETECCIÓN COHERENTE Y RECEPTORES

Cuando se estudia el desempeño en recepción para los sistemas ópticos, existen dos tipos de detección: directa y coherente. La detección directa, asociada con la modulación de intensidad (IM, Intensity Modulation), ha sido hasta ahora la combinación más usada en el ámbito comercial en los sistemas ópticos, por su facilidad de implementación [1]. Sin embargo, hoy en día se busca determinar hasta que punto se pueden lograr mayores ventajas con otros tipos de detección y esquemas de modulación.

La detección directa consiste en recibir la señal óptica a través de un fotodetector, hacer la conversión optoelectrónica, y posteriormente procesar la señal electrónicamente para ser demodulada y demultiplexada. Cuando se utiliza como fotodetector un diodo p-i-n, ocurre que la corriente generada por la señal óptica recibida es mucho más pequeña que

la generada por un fotodiodo de avalancha; debido a que la señal incidente en el receptor es baja, se hace más ventajoso para la detección directa el uso de fotodetectores de avalancha. El desempeño de los sistemas con detección directa era muy bajo, precisamente debido a la escasa intensidad de la luz incidente y a la presencia de ruidos propios de los fotodetectores como el ruido cuántico, el ruido de disparo, el ruido de corriente oscura, entre otros, al punto de estar 20dB por debajo del desempeño de los receptores coherentes [1]. Sin embargo, tras la aparición de los amplificadores EDFA (amplificadores de fibra dopada de erbio), su desempeño mejoró considerablemente y las ventajas en comparación con el desempeño de los receptores coherentes han disminuido [17].

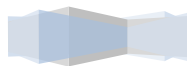
Una de las diferencias más sobresalientes entre la detección directa y la detección coherente, consiste en que esta última utiliza un oscilador local para introducir más potencia a la señal en recepción. La detección coherente será expuesta en el siguiente ítem.

1.2.1 Detección Coherente

Consiste en combinar la señal de luz incidente con una señal de luz producida por un oscilador local situado en recepción. Esto hace que se presente en recepción una señal con una frecuencia intermedia W_{IF} igual a la diferencia entre las frecuencias de estas dos señales. El rendimiento en recepción con detección coherente era mucho mejor que con detección directa debido a que el oscilador local prácticamente funciona como un amplificador de la señal de entrada, lo que hacía irrelevante la potencia de los ruidos. Sin embargo, este tipo de detección genera ruidos particulares, debido principalmente al uso del oscilador local. Dependiendo del valor de la frecuencia intermedia de la señal, se habla de dos tipos diferentes de receptores coherentes:

- **Receptores homodinos:** En estos receptores la frecuencia de la señal de luz producida por el Oscilador Local es igual a la frecuencia de la señal incidente, lo cual genera una frecuencia intermedia igual a cero. Este tipo de receptores presentan el mejor rendimiento posible, pero son muy difíciles de implementar debido a que, para lograr la condición de frecuencia intermedia cero, deben hacer una malla óptica de fase cerrada PLL para hacer seguimiento de fase¹. Si no se hace ésto, es necesario de todas formas tratar la señal óptica para poder contrarrestar los efectos producidos por el comportamiento aleatorio de la fase. Esta manipulación de la señal óptica es muy difícil de implementar, haciendo estos receptores poco comunes comercialmente.
- **Receptores heterodinos:** En estos receptores la frecuencia del oscilador local es diferente de la de la señal incidente, generando una frecuencia intermedia distinta de cero; cabe aclarar que todos los receptores heterodinos son receptores coherentes. Por motivo del desarrollo de este trabajo en el siguiente ítem se profundizará más sobre este tipo de receptores.

¹ Seguimiento de fase: "Phase Tracking"



La diferencia en desempeño entre los receptores homodinos y heterodinos no es muy grande, quedando este último a lo sumo 3dB por debajo. Sin embargo los receptores heterodinos son mucho más fáciles de implementar porque el seguimiento de fase se puede hacer electrónicamente, con mallas de fase cerrada PLL basadas en la teoría tradicional del procesamiento digital de señales. Por otro lado, cuando no se hace seguimiento de fase, el tratamiento de la señal incidente para contrarrestar el comportamiento aleatorio de la fase se hace mediante circuitos electrónicos, haciendo mucho más fácil su implementación so pena de un sacrificio no muy grande en rendimiento. Por estas razones es que este trabajo de investigación se enfoca en el estudio de **receptores ópticos heterodinos** ([1], [17] y [18]).

1.2.2 Receptores Heterodinos

Desde el punto de vista óptico, la combinación de la señal de luz incidente con una señal local para obtener otra señal de frecuencia intermedia, es una condición suficiente para determinar que un sistema con estas características es coherente. Sin embargo, desde el punto de vista del procesamiento digital de señales, esta condición no es suficiente para decir que el sistema es coherente. Por eso se habla de sistemas que son no-coherentes desde el punto de vista eléctrico, y coherentes desde el punto de vista óptico. Para que un sistema sea coherente desde el punto de vista eléctrico, debe hacer seguimiento de fase ([1], [17] y [18]).

Los receptores ópticos que hacen seguimiento de fase, son coherentes desde ambos puntos de vista, y por esta razón son conocidos como **receptores síncronos**, los cuales son más utilizados por los esquemas de modulación de fase. Sin embargo, existen receptores que no hacen este seguimiento de fase, por lo cual son no coherentes desde el punto de vista eléctrico, pero por combinar la señal incidente con una de un Oscilador Local, son coherentes desde el punto de vista óptico; éstos son conocidos como **receptores asíncronos** ([1], [17] y [18]).

Existen tres categorías dentro de esta clasificación de los receptores heterodinos: los síncronos, que hacen seguimiento de fase mediante una malla electrónica de fase cerrada; los asíncronos, que hacen detección de la envolvente, por lo cual no los afecta la aleatoriedad de la fase, y por lo cual solo se utiliza para esquemas de modulación de amplitud y de frecuencia; y los débilmente síncronos, que utilizan modulación de fase con DPSK, pero en vez de hacer seguimiento de fase hacen detección de envolvente [17].

Algunos receptores heterodinos típicos², entre los más usados, son:

- **Receptor de rama simple:** Este receptor síncrono utiliza un acoplador de 3dB para combinar la señal incidente con la del oscilador local. Se caracteriza por tener una malla para el control de la polarización, ya que si la polarización de las señales que se combinan no coincide, se presentan grandes pérdidas. Este receptor puede actuar como homodino o como heterodino, dependiendo de la configuración de la malla cerrada entre el oscilador local (LO) y la señal

² Todos los receptores mencionados en este capítulo y sus características fueron consultadas en [17], [18], [1], [19] y [2].

procesada, como se ve en la parte inferior de la figura 1.2. Si se utiliza como homodino, se hace seguimiento de la fase utilizando una malla óptica de fase cerrada; si se utiliza como heterodino, se hace seguimiento de la frecuencia a través de una malla de control automático de frecuencia. Este receptor es, por su estructura, el más simple, al punto que los primeros receptores heterodinicos utilizaron esta configuración ampliamente.

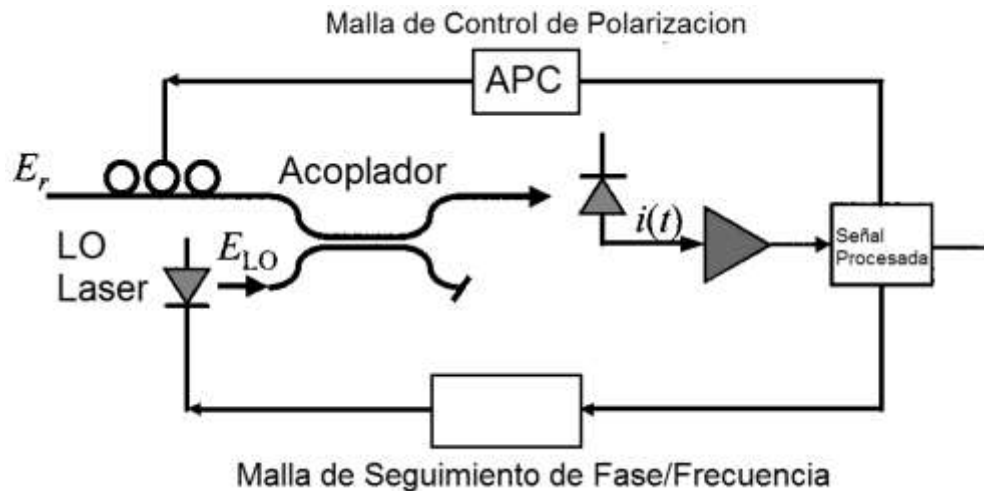


Figura 1.3 Receptor de rama simple [16]

Cuando en un sistema como este solo se presenta ruido de disparo y ruido térmico, que son ruidos generados por el fotodetector, y además se diseña como heterodino, se tiene una potencia de la señal

$$P_s = \frac{R^2}{2} P_{LO} P_R \quad (1.1)$$

Donde R es la responsividad del fotodiodo, P_{LO} es la potencia del Oscilador Local y P_R es la Potencia recibida.

$$P_s = R^2 P_{LO} P_R \quad (1.2)$$

Lo cual muestra la mejora de 3dB en el rendimiento de los receptores homodinicos con respecto a los heterodinicos. Bajo la presencia de otros ruidos, esta diferencia se hace mucho menor, pero esto se estudiará con detalle más adelante.

- **Receptor balanceado:** Este receptor utiliza también un acoplador de 3dB, pero además utiliza un fotodiodo dual balanceado que incrementa la potencia de la señal y elimina ruido generado por el oscilador local. El resto de la estructura es similar a la del receptor de rama simple, con malla de control de polarización y

mallas de seguimiento de fase o de frecuencia, si es homodino o heterodino respectivamente.

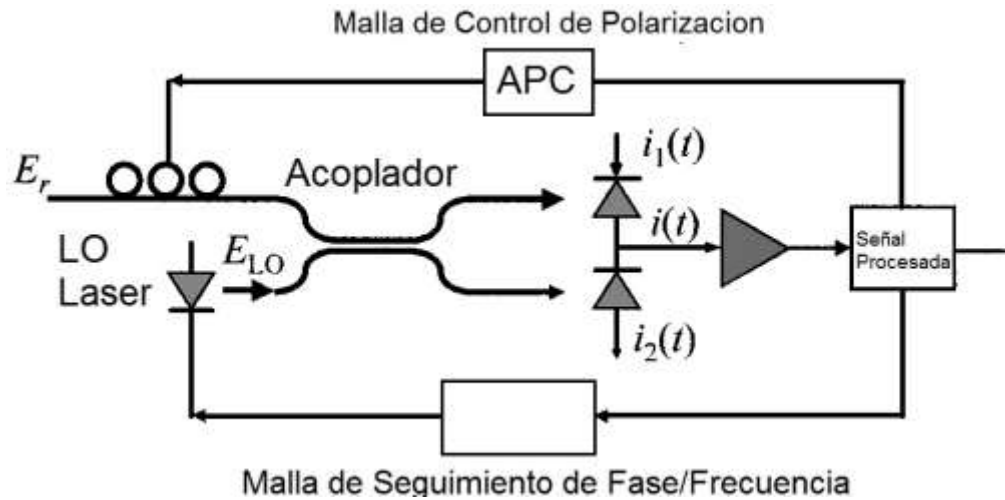


Figura 1.4 Receptor balanceado [17]

Si el receptor es heterodino, la potencia de la señal es

$$P_s = 2 R^2 P_{LO} P_R \quad (1.3)$$

Esta gran mejora en el rendimiento hace que los receptores balanceados sean los más comunes en la actualidad.

Cuando se utiliza bajo el esquema de modulación NRZ-OOK presenta una relación señal a ruido de:

$$\rho_s = \frac{A^2/4}{\sigma_n^2} \quad (1.4)$$

Donde A es la amplitud de la señal y σ_n^2 es la varianza del ruido, cuando el ruido dominante es el cuántico.

Bajo la misma condición, si el esquema es FSK o PSK, se tiene

$$\rho_s = \frac{A^2/2}{\sigma_n^2} \quad (1.5)$$

Obteniéndose con esto un mejor comportamiento frente al ruido que con NRZ-OOK.

- **Receptor heterodino ASK asíncrono:** Este receptor asíncrono se muestra en la figura 1.4, utiliza un filtro pasabanda para limitar la cantidad de ruido y un filtro pasa bajas con un tratamiento de la señal para obtener la envolvente de la misma.

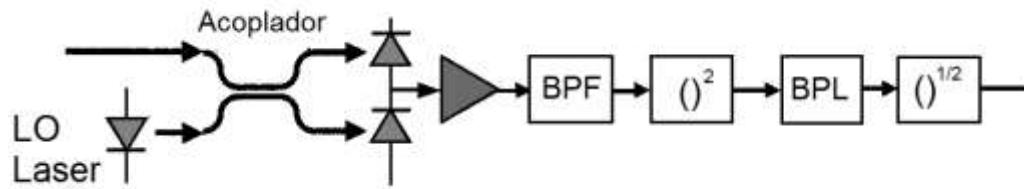


Figura 1.5 Receptor Heterodino ASK asíncrono [17]

En [17] se demostró que este receptor está 0.4dB por debajo en desempeño que el receptor síncrono balanceado actuando bajo el mismo esquema de modulación ASK, y en las mismas condiciones que se mencionaron anteriormente.

- Receptor heterodino FSK con detección de filtro dual:** Este receptor asíncrono, como se muestra en la figura 1.6, hace un tratamiento de la señal similar al ASK asíncrono que se acaba de mostrar, pero para dos frecuencias diferentes. Su rendimiento es similar al del heterodino asíncrono ASK

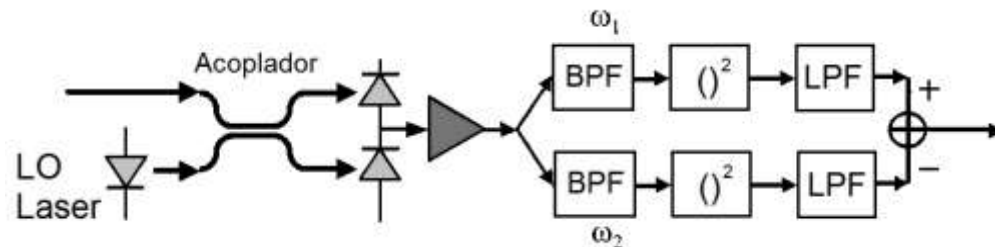


Figura 1.6 Receptor Heterodino FSK asíncrono [17]

- Receptor heterodino DPSK:** Este receptor asíncrono se diferencia de los heterodinos comunes porque demodula la señal utilizando circuitos multiplicadores y de retardo, haciendo con esto detección de envolvente. Este receptor tiene un comportamiento similar al FSK anteriormente mencionado, pero con la diferencia de lograr un desempeño mejor en 3dB. Esto se da ya que el valor esperado de ambas señales (FSK y DPSK) son iguales, pero la varianza del ruido es reducida a la mitad debido a que en DPSK el ruido es promediado sobre dos intervalos de tiempo.

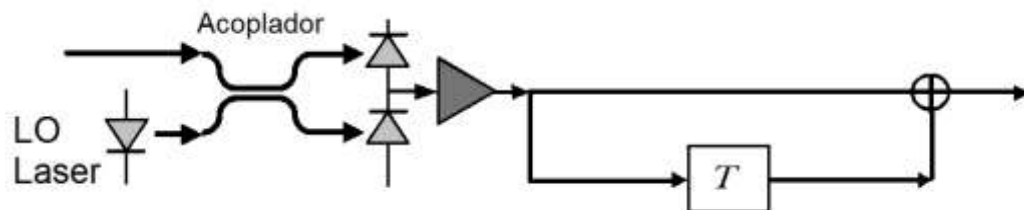


Figura 1.7 Receptor Heterodino DPSK Asíncrono [17]

Algunos análisis comparativos de los anteriores receptores y otros que no se abordan en este trabajo de investigación, se presentan en la tabla 1.2 y en la figura 1.8 en las cuales se mide la sensibilidad de cada receptor:

| FORMATO DE MODULACION | Ruido de Disparo (fotones / bit) | Ruido de Amplificador (fotones / bit) | Penalidad (dB) |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Homodino PSK | 9 | 18 | 0 |
| Heterodino PSK | 18 | 18 | 0 |
| Heterodino | 20 | 20 | 0.45 |
| Deteccion Directa DPSK | - | 22 | 0.85 |
| Homodino ASK | 18 | 36 | 3 |
| Heterodino ASK, FSK | 36 | 36 | 3 |
| Detección Heterodino Envoltente ASK | 39 | 39 | 3.4 |
| Deteccion Directa ASK, FSK | - | 40 | 3.6 |
| Filtro Doble FSK, PoSK | 40 | 40 | 3.5 |
| Filtro Simple FSK | 80 | 80 | 6.5 |

Tabla 1.2 Comparación del desempeño de varios tipos de receptores [17]

En la tabla muestra la probabilidad de error de 10^{-9} cuando el sistema está dominado por el ruido de disparo o por el ruido de amplificador.

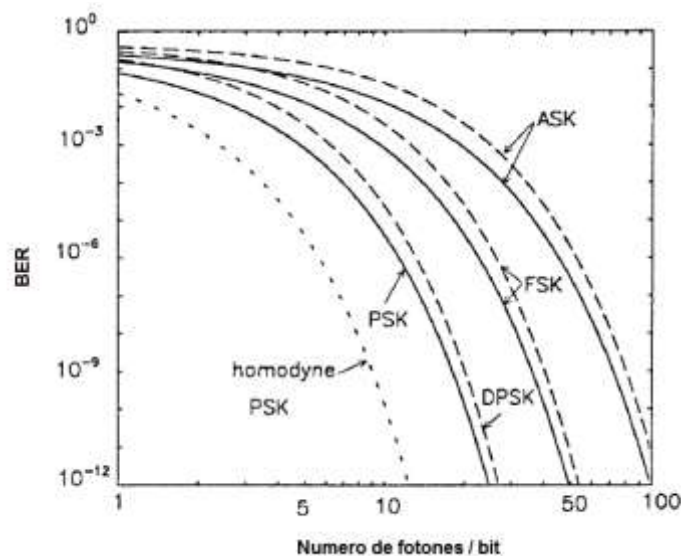


Figura 1.8 Curvas del BER para receptores heterodinios síncronos (líneas continuas) y asíncronos (líneas punteadas) [18]

La figura 1.8 muestra las curvas BER para diferentes formatos de modulación con receptores heterodinos síncronos y asíncronos, de esta figura también se puede determinar la sensibilidad de los diferentes tipos de receptores heterodinos [18].

1.3 RUIDOS EN RECEPCIÓN PARA SISTEMAS WDM

Hasta ahora se han enunciado varios tipos de receptores que soportan diferentes esquemas de modulación y en la tabla 1.2 se comparó su desempeño bajo condiciones ideales, es decir, bajo el dominio del ruido de disparo o el ruido de amplificador, los cuales no presentan grandes efectos sobre la señal. Dependiendo del tipo de receptor, el esquema de modulación y los elementos que componen el sistema en recepción, existen una gran cantidad de ruidos que afectan la señal, dominando unos tipos de ruido sobre los otros según las condiciones mencionadas.

Los ruidos que se estudiarán se definen como lineales si la relación entre el ruido y la potencia de la señal es lineal, y se definirán como no lineales en caso contrario.

Por otra parte, los ruidos comunes se consideran efectos lineales de la fibra. Sin embargo, otros efectos lineales como la dispersión, inducen ruido y distorsión de la señal. Además, algunos efectos no lineales de la fibra inducen ruido no lineal de fase. Con base en esta clasificación se agrupan y describen los diferentes tipos de ruido.

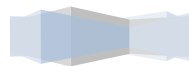
1.3.1 Ruidos lineales ([17], [18], [1], [20], [21], [2])

Ruido cuántico: Este ruido es el que se produce por el simple hecho de que no hay certidumbre sobre el número de fotones que llegan al receptor debido a que es transmitido un uno, para el caso de modulación OOK (si se transmite un cero no se reciben fotones), o que no se puede determinar el dato que llega por la aleatoriedad en el número de fotones recibidos. La llegada de los fotones al receptor está dada por una distribución poisson y genera una BER para el caso en que se recibe un uno. Esto permite definir un límite cuántico, que es el número de fotones que se deben recibir en el receptor para alcanzar una BER determinada, lo más baja posible. Ese número mínimo de fotones tienen estrecha relación con la potencia de transmisión, así que también permite relacionar este parámetro con la BER.

Ruido de oscuridad: Los fotodiodos reales producen una corriente oscura producto de la generación espontánea de pares electrón-hueco, que se presenta sin importar si hay o no hay luz incidente. Esta corriente oscura produce su propio “ruido de disparo” o ruido de oscuridad.

Ruido térmico: Se produce en los amplificadores, y es producto de la generación aleatoria de pares electrón-hueco por los cambios de temperatura.

Los ruidos mencionados hasta el momento no son tomados en cuenta en el análisis detallado de la siguiente sección porque cuando la potencia del Oscilador Local es lo suficientemente alta, el ruido de disparo es dominante sobre todos estos ruidos [1].



Ruido de disparo: Es el ruido que se genera por la creación aleatoria de pares Hoyo-Electrón cuando los fotodiodos hacen la transformación de la señal óptica a eléctrica. Este ruido tiene una Densidad Espectral de Potencia que depende de un parámetro de los fotodiodos llamado Responsividad. Cuando la potencia de la señal es suficientemente grande, este ruido adquiere una distribución Gaussiana; si el valor esperado del tiempo entre los eventos de generación de pares electrón-hueco es menor que el tiempo de respuesta del fotodiodo, el ruido es Gaussiano, y si el ancho de banda es mayor que el tiempo de respuesta del fotodiodo, el ruido es además blanco. En el momento en que el ruido tiene este comportamiento, se pueden aplicar todas las técnicas ya ampliamente conocidas para limitar su efecto sobre la señal.

Ruido de amplificación: También conocido como “Signal-Spontaneous Emission Beat Noise”, se presenta en los fotodiodos por la combinación de la señal con “emisiones espontáneamente amplificadas”, también conocido como Ruido Amplificado de Emisión Espontánea (ASE Amplified Spontaneous Emission noise) que generan los amplificadores, razón por la cual solo existe en el dominio eléctrico después de la fotodetección.

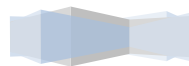
Sobre estos últimos dos ruidos, no se tienen en cuenta para la próxima sección debido a que en la tabla 1.2 ya se esboza su efecto de acuerdo con el uso de diferentes tipos de receptores ópticos bajo diferentes esquemas de modulación.

Además de estos ruidos, existen otros que se producen por los efectos lineales y no lineales de la fibra óptica. Los que son consecuencia de los **efectos lineales** se listan a continuación:

Ruido Relativo de Intensidad: Este ruido se produce por la inestabilidad en el nivel de potencia del láser. En láseres semiconductores actuando por encima del umbral, siempre existe un pequeño porcentaje de fotones que se generan por emisión espontánea, lo que produce vibraciones en la cavidad del láser o fluctuaciones en el medio de ganancia (Laser Gain Medium) y se presenta el ruido de intensidad. El ruido relativo de intensidad hace referencia a la razón entre la densidad espectral de potencia del ruido de intensidad con respecto a la potencia total de la señal. Este ruido no es tenido en cuenta para el análisis de la siguiente sección debido a que el uso de receptores balanceados produce un efecto casi nulo sobre la señal.

Ruido de fase del láser: Este ruido se produce por la emisión espontánea de fotones, que no solo afecta la densidad de fotones, también produce variaciones de la fase. Por otro lado, el índice de refracción de la cavidad del láser depende de la densidad de fotones, lo cual incrementa significativamente el ruido de fase, y hace que el ancho de línea (linewidth) de los láseres semiconductores sea mucho más grande que la de otros láseres de estado sólido. Por sus efectos sobre la señal y por no estar subordinado a otros tipos de ruido, será tenido en cuenta para el análisis en la siguiente sección.

Error de fase diferencial: Este ruido se produce cuando al usar modulación DPSK, sus circuitos retardadores y multiplicadores (exclusivos de este tipo de receptores) generan un retardo de la fase, que aumenta la BER. Cuando se utiliza el receptor heterodino DPSK, el retardo usado en los circuitos retardadores y multiplicadores de la PLL, debe ser un múltiplo entero de 2π ; para que el error de fase sea cero se debe cumplir la relación $e^{j\omega T} = 1$, donde T es el retardo mencionado, y es aproximadamente igual al tiempo de



símbolo de la señal DPSK. Un error de fase es inducido al sistema si $e^{(j\omega_i T)} = e^{j\theta_e}$, donde $-\pi < \theta_e < +\pi$ es el error de fase del receptor. Debido a que la herramienta de simulación que se utiliza en este trabajo parte de la condición expuesta sobre la necesidad de que el retardo debe ser múltiplo entero de 2π , es imposible ver el efecto de este ruido, por lo cual no se tendrá en cuenta para la siguiente sección.

Ruido inducido por dispersión ([14] y [19]): Tanto la dispersión cromática como la dispersión por polarización de modo, generan un ensanchamiento de los pulsos, debido al cambio de velocidad de las componentes de frecuencia o de los modos de polarización de la señal. Este ensanchamiento distorsiona la señal, aumentando la BER. La dispersión cromática genera un efecto llamado **Dispersión de Velocidad de Grupo (GVD, Group Velocity Dispersion)**, ya que las componentes de la señal no viajan con la misma velocidad, lo que genera la distorsión del pulso. La dispersión por polarización de modo genera un efecto llamado **Retardo Diferencial de Grupo (DGD, Differential Group Delay)**, donde las componentes de polarización no viajan a la misma velocidad.

1.3.2 Ruidos no lineales ([17], [18], [1], [20], [21], [2])

La respuesta de todos los materiales dieléctricos a la luz pasa a ser no lineal cuando se aplican señales ópticas de gran intensidad. Los materiales de la fibra no son la excepción, y debido al efecto Kerr, su índice de refracción se incrementa proporcionalmente con la intensidad hasta el punto de reducir la velocidad de propagación, e induciendo de esta forma un desplazamiento no lineal de la fase que depende de dicha intensidad.

El efecto Kerr se origina de la susceptibilidad de tercer orden del silicio y depende de la composición del vidrio, del dopado del material, del tamaño del “core”, del diseño de la “cross-section”. La interacción del efecto Kerr con los ruidos que producen los amplificadores, genera los ruidos que se estudian a continuación, los cuales serán detalladamente analizados en la siguiente sección:

Ruido de fase no lineal inducido por automodulación de fase SPM: La automodulación de fase es un efecto no lineal que como ya se mencionó se produce por el efecto Kerr. Cuando un pulso se propaga a través de la fibra, el flanco de subida de su amplitud produce incremento en el índice de refracción, mientras que el flanco de bajada genera una disminución del mismo, generando cambios en la fase. Como éste cambio es producido por la misma señal, el efecto se llama automodulación de fase.

Ruido de fase no lineal inducido por modulación de fase cruzada XPM: El efecto de modulación de fase cruzada tiene un comportamiento similar al de automodulación de fase, con la diferencia de que el cambio en el índice de refracción sobre un canal ya no solo lo produce la propia señal, sino que lo producen las demás señales que se transmiten.



1.4 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL RUIDO EN RECEPCIÓN CUANDO SE UTILIZA DETECCIÓN COHERENTE EN SISTEMAS WDM

Una condición particular que se presenta en detección coherente con los ruidos mencionados, y que fue demostrada en [1], es que si se aumenta la potencia del OL, el ruido de disparo se aumentará en recepción, mientras que los otros ruidos se mantendrán en su valor habitual, debido a que son independientes de dicha potencia del LO, obteniendo con esto una condición en recepción de dominio del ruido de disparo, que podría comportarse como un ruido blanco gaussiano bajo ciertas condiciones, lo que no sucede con los otros ruidos.

Trabajos posteriores a [1] demostraron que bajo la presencia de los EDFAs, el ruido de amplificación generado por estos domina sobre el ruido de disparo.

En la tabla 1.2 de la sección 1.2.2, se describe el efecto del ruido de disparo y del ruido de amplificación sobre varios tipos de receptores homodinos y heterodinos con diferentes esquemas de modulación, cuando solo hay presencia de estos ruidos.

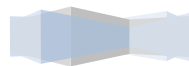
El objetivo de esta sección es analizar el efecto de los ruidos más relevantes que se presentan en recepción cuando se utiliza detección coherente en sistemas WDM, razón por la cual se han escogido algunos de los ruidos listados en la sección anterior. Se tienen en cuenta los ruidos que se producen por efectos lineales, ya que la presencia de estos efectos y sus consecuencias sobre la señal aparecen inevitablemente bajo ciertas condiciones de la red WDM; estos ruidos se producen principalmente por emisiones espontáneas del láser, tanto en el transmisor como en el Oscilador Local del receptor coherente. De los efectos no lineales se prioriza el análisis de la SPM y de la XPM, que los cuales producen cambios no lineales de la fase. Estos ruidos son los más comunes en redes WDM cuando se utilizan altas tasas de transmisión y un alto número de canales, tópicos de gran importancia para los operadores por sus ventajas comerciales.

En síntesis, los ruidos escogidos para el análisis en la simulación son:

- Ruido de fase del láser
- Ruido inducido por dispersión
- Ruido de fase no lineal inducido por SPM
- Ruido de fase no lineal inducido por XPM

1.4.1 Ruido de fase del láser

Este ruido se produce por la emisión espontánea de fotones, que no solo afecta la densidad de fotones, también produce variaciones de la fase. Por otro lado, el índice de refracción de la cavidad del láser depende de la densidad de fotones, lo cual incrementa significativamente el ruido de fase, y hace que el ancho de línea (linewidth) de los láseres semiconductores sea mucho más grande que la de otros láseres de estado sólido. En [22] se obtiene una ecuación diferencial para la variación de la fase en el dominio del tiempo:



$$\frac{d\phi(t)}{dt} = F_{\phi}(t) - \frac{\alpha_{lw}}{2p} F_p(t) \quad (1.9)$$

Donde

$$\langle F_p(t)^2 \rangle = 2R_{sp}P \quad \text{y} \quad \langle F_{\phi}(t)^2 \rangle = \frac{R_{sp}}{2P}$$

En estas ecuaciones, P es la densidad de fotones, R_{sp} es el factor de emisión espontánea, y F_{ϕ} y F_p son términos de ruido Longevin para la fase y la intensidad, respectivamente. El término α_{lw} es el factor de incremento del ancho de línea (linewidth). El primer término del lado derecho de la ecuación para la variación de la fase, ilustra la contribución de la emisión espontánea a la variación de la fase. El segundo término muestra que cada vez que se presenta una emisión espontánea, se emite aleatoriamente un fotón que cambia la densidad de portadores, y en consecuencia, el índice de refracción del material; este cambio altera la condición de resonancia de la cavidad del láser e introduce un cambio de fase en el campo óptico emitido. Finalmente, su densidad espectral de potencia puede expresarse como [22]

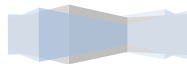
$$\langle \phi(t)^2 \rangle = \frac{R_{sp}}{2P} [1 + \alpha_{lw}^2] [t] \quad (1.10)$$

El ancho de línea se define como [22]

$$\Delta f_L = \frac{R_{sp}}{4\pi P} (1 + \alpha_{lw}^2) \quad (1.8)$$

Bajo el dominio del ruido de amplificador, el desempeño de los receptores heterodinos y homodinos es el mismo frente al ruido de fase del láser. En [21] se demostró que en receptores heterodinos, el efecto de éste ruido se puede reducir mediante la recuperación de una portadora con el mismo ruido de fase.

Para receptores heterodinos DPSK, Δf_L es el FWHM (Full Width Half Maximum) ancho de línea, que es la combinación de los correspondientes valores de este parámetro para el láser transmisor y el Oscilador Local. En la siguiente figura se muestra una relación entre la probabilidad de error de la señal DPSK con ruido de fase del Láser para diferentes valores de Δf_L normalizado.



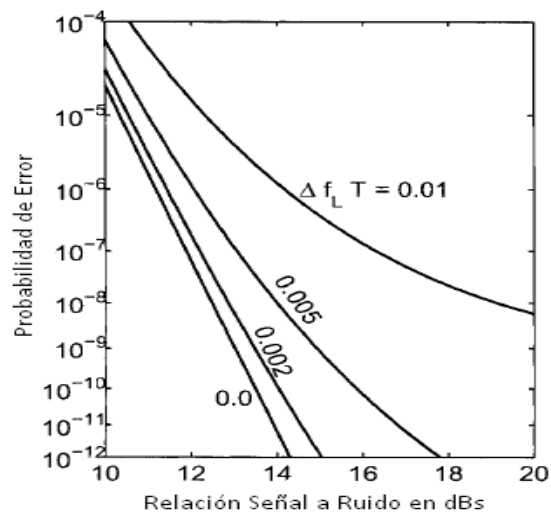


Figura 1.9 OSNR con ruido de fase del láser en DPSK [17]

1.4.2 Ruido inducido por dispersión

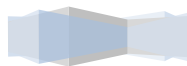
Dos de los ruidos que más limitan las comunicaciones ópticas son la Dispersión Cromática (Chromatic Dispersion) y la Dispersión por Modo de Polarización (Polarization Mode Dispersion).

- Se le llama **Dispersión Cromática** al fenómeno por el cual varios componentes espectrales de la señal no viajan a la misma velocidad, causando que los pulsos se deformen (ensanchen) y que se combinen entre si; este fenómeno es conocido como “Interferencia Intersimbolo”, la cual hace mas difícil para el receptor diferenciar entre un “1” y un “0”, y no se puede captar correctamente el mensaje transmitido.

Una de las características de la Dispersión Cromática es que crece a un factor de 4^2 de la tasa de bits transmitidos, lo que causa que los enlaces sean limitados a unos pocos kilómetros a medida que crece la tasa de transmisión. Este tipo de dispersión puede ser compensada con módulos de compensación de dispersión (DCM), fibras compensadoras de dispersión (DCF), Fiber Bragg Gratings (FBG) o con procesamiento digital de señales [19].

- Se le llama **Dispersión por Modo de Polarización** a la variación de la velocidad de las componentes de la señal de acuerdo con los modos de polarización dentro de la fibra; es causada por defectos de fabricación cuando el núcleo de la fibra no es perfectamente circular, limitaciones dentro de la fibra, estrés inducido por birrefringencia [23].

La Dispersión por Modo de Polarización causa ensanchamiento de los pulsos, pero a diferencia de la Dispersión Cromática, la polarización cambia el modo de dispersión rápidamente con el tiempo (de un rango de segundos a milisegundos). [24]. Por este motivo es muy difícil prever el impacto que puede tener en el tiempo,



ya que de un momento a otro puede generar grandes cambios en la BER llevándola muy por encima de los límites permitidos. Por otro lado, esta dispersión crece linealmente con la duración del símbolo, por ejemplo en un enlace de 40Gbit/s, la señal es de 4 veces menos tolerable al PMD que uno de 10Gbit/s; aunque las limitaciones de la dispersión son difíciles de superar para 40Gb/s y 100Gb/s [19].

Los métodos de compensación del PMD son hasta el momento demasiado costosos y no logran mitigar los efectos de la dispersión, con lo que se explica que su implementación no se haya dado a gran escala. Pero esto podría cambiar debido a la creación de nuevas fibras compensadoras de PMD, la implementación de diferentes formatos de modulación (DPSK y PSBT) y con el procesamiento digital de señales asociadas a receptores Coherentes [19].

1.4.3 Ruido de fase no lineal inducido por automodulación de fase SPM

La automodulación de fase es un efecto no lineal que como ya se mencionó se produce por el efecto Kerr. Cuando un pulso se propaga a través de la fibra, el flanco de subida de su amplitud produce incremento en el índice de refracción, mientras que el flanco de bajada genera una disminución del mismo, generando cambios en la fase. Como éste cambio es producido por la misma señal, el efecto se llama automodulación de fase. El cambio en la fase se convierte en ruido de fase no lineal que se calcula utilizando la siguiente ecuación [17]:

$$\Phi_{NL} = \int_0^L \gamma P(z) dz = \gamma L_{eff} P \quad (1.13)$$

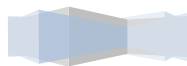
Donde

$$\gamma = \frac{\omega_0 \tilde{n}_2}{A_{eff} c} \quad y \quad L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

En la primera, γ es el coeficiente no lineal, para el cual ω_0 es la frecuencia angular, c es la velocidad de la luz, \tilde{n}_2 es el coeficiente no lineal del índice de refracción, A_{eff} es el área efectiva del core de la fibra y L_{eff} es la longitud efectiva no lineal, en la cual α es el coeficiente de atenuación y L es la longitud del span.

Cuando se utiliza una fibra de pocas pérdidas, con poca dispersión, el efecto que produce el índice de refracción no lineal crece, especialmente cuando se usan amplificadores. Si la potencia $P = |E + n|^2$, donde n representa el ruido de amplificador, el ruido de fase que producen los N_A span que tenga el sistema, es [17]:

$$\Phi_{NL} = \gamma L_{eff} \{ |E_0 + n_1|^2 + |E_0 + n_1 + n_2|^2 + \dots + |E_0 + n_1 + \dots + n_{N_A}|^2 \} \quad (1.14)$$



Donde E_0 es la representación en banda base del campo eléctrico transmitido.

El efecto de modulación de Fase propia SPM depende de: la longitud de onda de la señal, entre más grande es hay menos SPM; la tasa de transmisión, entre más alta esté por encima de los 10Gbps, más SPM se presenta; la dispersión, entre menos dispersión haya en el sistema, menos SPM se presenta [14].

1.4.4 Ruido de fase no lineal inducido por modulación de fase cruzada XPM

El efecto de modulación de fase cruzada tiene un comportamiento similar al de automodulación de fase, con la diferencia de que el cambio en el índice de refracción sobre un canal ya no solo lo produce la propia señal, sino que lo producen las demás señales que se transmiten.

El ruido de fase no lineal inducido por este efecto es el mismo que por el inducido por el SPM, pero multiplicado por el factor $(2M-1)$, donde M es el número de canales [14]

$$\Phi_{NL} = (2M - 1) \int_0^L \gamma P(z) dz = \gamma L_{eff} P (2M - 1) \quad (1.15)$$

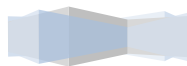
Los canales transportan las señales con velocidades de grupo diferentes, lo cual hace que los canales no viajen “alineados”; sin embargo, se crea una relación entre unos y otros que hace que se “amontonen” en su viaje, fenómeno que se conoce como “Walk-off”. La presencia de este efecto reduce las fluctuaciones inducidas por la XPM, y aumenta cuando se incrementa el espaciamiento de canal.

Este efecto depende de [14]:

1. Potencia de entrada en el canal, entre más alta es la potencia, mayor presencia de XPM.
2. Espaciamiento de canal, a mayor espaciamiento menor XPM debido al efecto walk-off.
3. Dispersión de la fibra, entre más baja menor presencia de XPM.
4. Área efectiva del core de la fibra, entre más grande habrá menos XPM.

1.4.5 Desempeño en recepción de acuerdo con la modulación ([14], [17], [19] y [25])

Se puede observar a través de la tabla 1.2 y algunos análisis del desempeño de los receptores mediante la implementación de formatos de modulación, que los formatos que presentan mejor desempeño son aquellos que modulan en fase, por encima de la



modulación de la amplitud o la frecuencia. Los formatos de modulación en fase tienen como ventaja adicional que permiten un mejor uso del espectro ya que se pueden implementar un mayor número de canales, principalmente si se utiliza modulación multinivel.

Por otro lado, en trabajos anteriores ([17], [5], [25], [7]) se ha demostrado que en la sección del transmisor y del canal, el desempeño de los formatos de modulación en fase permite mayores velocidades de transmisión de datos y mayores longitudes por span. Otros formatos como MSK o CPFSK presentan un desempeño cercano a los formatos de modulación en fase, pero no tienen la ventaja de la eficiencia del espectro y no son tan comunes comercialmente.

Debido a que el efecto del ruido sobre sistemas modulados en fase es diferente al efecto sobre los modulados en amplitud, es necesario mirar que cambios ocurren en dicho efecto al variar el esquema de modulación, y verificar si el uso de uno u otro bajo determinadas condiciones, puede ayudar a mitigar el efecto del ruido.

1.5 MODELO SIMPLIFICADO DE RED PARA IDENTIFICAR EL DESEMPEÑO EN RECEPCION DE REDES WDM

Con el fin de analizar el efecto del ruido en redes WDM cuando se utiliza detección coherente, es necesario construir un modelo simplificado de red en el cual se midan algunos parámetros de la red los cuales permitan identificar con claridad el desempeño que tiene el sistema bajo ciertas condiciones del enlace.

Para poder identificar los efectos del ruido en recepción para redes WDM, es necesario tener unas características de red que combinen tres criterios:

- Debe tener algunas características comunes de las redes WDM comerciales, ya que éstas se han impuesto sobre otras porque generan mejor desempeño de los sistemas, y conllevan nuevos problemas a resolver en términos del efecto del ruido y de la distorsión de la señal.
- Deben variarse algunas características comunes para generar condiciones poco favorables, donde sea posible presenciar los efectos del ruido, las razones por las que se generan y los parámetros a variar en recepción para poder mitigar dichos efectos.
- Debe lograrse que se mitiguen los efectos que no generan ruido, pero que distorsionan la señal, ya que esto no permite verificar los efectos de los ruidos en recepción, enfoque principal de este trabajo.

Para la construcción del modelo simplificado de red, se parte del trabajo [26], en el cual se estableció un modelo basado en las características de redes de varios operadores nacionales de telecomunicaciones. Dicho modelo consiste en una topología anillo de 3 nodos, con distancia igual entre los nodos. El análisis de simulación se hace sobre uno de los tramos entre dos nodos, ya que los efectos presentes entre cualquier par de nodos son iguales para los otros enlaces del anillo.



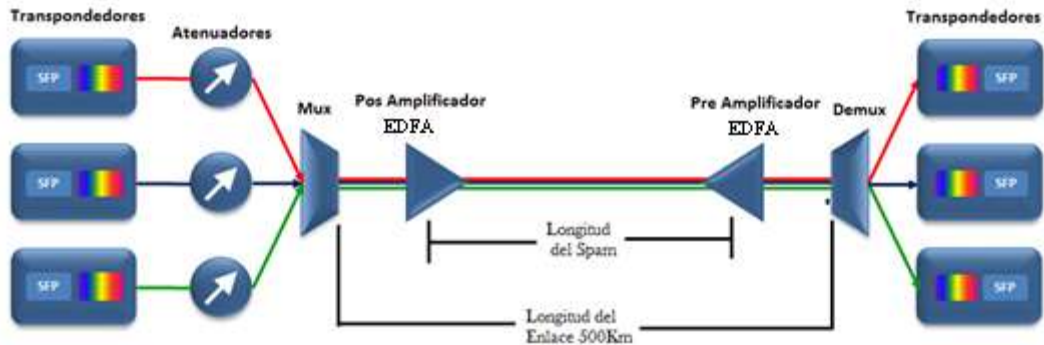


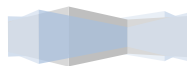
Figura 1.10 Modelo simplificado de red [16]

Basándose en [26] y en la recomendación ITU-T G.652 [27] para las fibras tipo SSMF-28, se definen las características del enlace de la siguiente manera:

1. Tipo de fibra : SSMF-28 (Standard Single-Mode Fiber, Fibra monomodo estándar), que son fibras con cero dispersión en la ventana de los 1310nm, pero que presentan baja dispersión positiva en la ventana de los 1550nm, además de ser el tipo de fibra más común. Para largas distancias y altas tasas de transmisión, se ve fuertemente afectada por la dispersión.
2. Se trabajarán canales en la banda C, alrededor de los 1550nm. De acuerdo con [8], recomendación que define este tipo de fibra, la atenuación es de 0.275dB/Km, el coeficiente de dispersión es de 17ps/nm*Km, el coeficiente de dispersión residual es de 0.09ps/nm*Km².
3. Se trabajará una longitud máxima del enlace de 500 Km, ya que a distancias mayores la señal podría distorsionarse al punto que los amplificadores no puedan contrarrestar los niveles de atenuación y sea necesario usar regeneradores [14]. Es de suma importancia tener en cuenta que para este trabajo de investigación no es conveniente usar regeneradores, ya que estos reparan la señal a su forma original y le quitan todo el efecto del ruido que se pretende medir. Como se ha podido ver en secciones anteriores, la dispersión y los ruidos producidos por efectos no lineales aumentan con el incremento de la distancia, sin embargo es fundamental encontrar un equilibrio entre una buena presencia del efecto de estos ruidos y una baja atenuación de la señal para que se puedan llevar a cabo las mediciones del efecto del ruido. Por esta razón, las consecuencias de la variación de la distancia se analizarán modificando la longitud del span, mientras que se determina una longitud máxima de 350 Km para el enlace, de forma tal que la señal se mantenga lo suficientemente fuerte como para ser analizada en la simulación.
4. Se utilizará tecnología WDM unidireccional con espaciamiento de 100GHz (0.8nm), que soporta un máximo de 32 canales para transmisión o recepción, ya que una de las principales razones de la presencia de interferencia, presencia de efectos no lineales y ruido, es la implementación de muchos canales. De esta forma se utiliza al máximo la

distribución de canales de acuerdo con la recomendación ITU-T G.694.1 [8], pero este parámetro, si es necesario, podría aumentarse aún más reduciendo el espaciamiento de 100GHz, y con esto, buscar adicionar más canales para evaluar el desempeño. Es importante forzar el incremento de canales, ya que es uno de los principales objetivos de los operadores, y una de las condiciones que más afectan el desempeño.

5. La tecnología interna de los multiplexores y demultiplexores no presentan diferencias muy profundas que afecten el desempeño. El Arreglo de Rejillas de Onda (AWG, Array Wave Gratings) ofrece un mejor desempeño cuando se utiliza un número alto de canales, pero genera bajo ciertas condiciones PMD sobre la señal, razones por las cuales se puede utilizar o descartar dependiendo del efecto que se esté estudiando.
6. Debe utilizarse amplificadores, ya que es necesario llevar la señal hasta el final del enlace; sin embargo, el número de span, la longitud de los mismos entre otras condiciones, pueden generar cambios en el desempeño del sistema, por lo cual este parámetro debe variarse de acuerdo con los escenarios de simulación que se definan. Es importante para evaluar el efecto del ruido, que la señal no esté atenuada, y que se puedan observar los efectos de todos los ruidos sobre la señal, incluido el del propio amplificador. Los amplificadores EDFA son los más utilizados comercialmente, a pesar de añadir ruido a la señal, razón por la cual se utilizará este tipo de amplificadores en el modelo de red.
7. Los módulos de compensación de la dispersión (DCM, Dispersion Compensation Modules) añaden dispersión negativa para compensar la dispersión positiva que se presenta por las características dispersivas del láser transmisor, el uso de la banda C en la ventana de los 1550nm, el uso de altas velocidades de bits y de longitudes altas para el enlace y los span. Estos módulos sirven para controlar los niveles de dispersión que se presenten en la comunicación, así que dependiendo de los efectos que deseen medirse, debe calcularse la cantidad de dispersión que debe existir en el enlace. Esto lleva al uso obligado de estos módulos sobre la base de la planeación de la dispersión que se lleve a cabo, la cual determina también si se realiza pre-compensación o post-compensación.
8. La velocidad de transmisión del sistema se ubicó en 10Gbps, debido a que a esta tasa se pueden percibir todos los ruidos de interés, y es muy difícil lograr un buen desempeño. Se parte de este valor, pero se debe tener en cuenta que lo ideal de estos sistemas para los operadores es que alcancen mayores velocidades de transmisión. Dicho aumento también afecta significativamente su desempeño, razón que justifica más la posibilidad de variación de este parámetro en trabajos futuros.
9. El esquema de modulación es otro parámetro a variar, ya que es importante verificar si el uso de un determinado tipo de modulación puede generar un mejor desempeño del sistema. De acuerdo con lo especificado en la sección 1.4.8, se definen los formatos NRZ-OOK, NRZ-DPSK para trabajar en el presente trabajo y, con base en esto, se definen los receptores apropiados, de acuerdo con lo revisado en la sección 1.2.
10. En el lado transmisor, de acuerdo con lo desarrollado en [26], se utilizará láser CW a 0.5MHz de FWHM, modulador óptico externo Mach-Zehnder y filtros de Bessel de



orden 6. El valor de la FWHM se variará para determinar el efecto del ruido de fase del láser, que aumenta con el incremento del valor de éste parámetro.

El modelo simplificado de red se puede resumir en la siguiente tabla:

| PARAMETROS | VALORES |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de Fibra | SSMF-28 |
| Ventana | Alrededor de 1550nm |
| Banda | Banda C |
| Estándar | ITU-T G.652 |
| Tecnología de red | DWDM unidireccional |
| Número máximo de canales | 32 canales |
| Espaciamiento de canales | 100Ghz (0.8nm) |
| Atenuación para 1550nm | 0.275 dB/Km |
| Coefficiente de dispersión | 17ps/nm*Km |
| Coefficiente de dispersión residual | 0.09ps/nm*Km ² |
| Potencia de Transmisión del láser | -6dBm a 5dBm |
| Filtros ópticos en el Transmisor | Filtros Bessel de orden 6 de 10GHz |
| Tipos de modulación | Externa con moduladores Mach-Zender |
| Tasa de transmisión del sistema | 10Gbps |

Tabla 1.3 Características modelo simplificado de red.

A manera de síntesis se pudo extraer de los trabajos estudiados, desde un punto de vista teórico, los siguientes efectos del ruido sobre detectores coherentes:

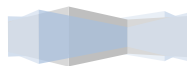
- El Ruido Relativo de Intensidad RIN produce una reducción de la OSNR y por ende un aumento de la BER, principalmente cuando se utilizan receptores heterodinos de Rama Simple; con receptores heterodinos balanceados, el efecto de este ruido se ve reducido considerablemente.
- El ruido de fase del láser produce una variación lineal de la fase y sus fluctuaciones en intensidad afectan la densidad de fotones, generando un aumento de la BER.
- El error de fase diferencial genera un cambio de fase, que aumenta la BER.
- El ruido inducido por dispersión genera un ensanchamiento de los pulsos, que a su vez aumentan la ISI (Inter-Symbol Interference, Interferencia Inter-Símbolo) y la BER.
- Los ruidos inducidos por efectos no lineales producen cambios no lineales de la fase, que aumentan la BER y distorsionan la señal.

Se pudo observar además una relación entre la dispersión y la presencia de los efectos no lineales, que inducen ruido de fase no lineal y esto influye profundamente en la planeación del enlace.

El aporte de este trabajo es el de complementar el análisis teórico recogido con el análisis del desempeño de los receptores ópticos coherentes, bajo unas condiciones especiales

de red WDM, cuando se presentan todos los ruidos estudiados, al mismo tiempo, a través del desarrollo de las simulaciones, lo cual se trabajará en los siguientes capítulos.

Con todo esto se pudo definir un modelo simplificado de red, que busca cumplir con unos criterios de funcionamiento que se ajustan a las necesidades de este trabajo de investigación y a las condiciones de redes comerciales.



CAPITULO 2. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se define los escenarios de simulación, basados en el modelo simplificado de red, con el fin de analizar el desempeño frente al ruido de los receptores ópticos coherentes heterodinos en redes DWDM, receptores que fueron abordados en el capítulo 1. Para esto es necesario variar algunos parámetros de la red como se plantea más adelante en este capítulo, ya que el cambio de las configuraciones de red producen algunos tipos de ruido en particular, y lo que se busca es que estén presentes los ruidos destacados en la sección 1.4. Estos escenarios deben brindar unas condiciones que aseguren la presencia de estos ruidos y que se pueda medir como afectan la señal óptica, por lo cual la distorsión de la señal debe alcanzar un punto de equilibrio en el cual la atenuación permita ver el efecto del ruido.

Se define también una metodología de simulación adecuada para obtener los resultados necesarios y confiables, que permitan una mejor utilización de la herramienta de simulación OptSim de Rsoft

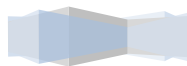
2.1 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Teniendo en cuenta los documentos “*introducción a los simuladores*” [28] del manual de OPNET y el documento “*simulador digital*” [29] se define la metodología de simulación que permitirán recrear un entorno, el cual se puede manipular de modo que se conozca de antemano los resultados, ventajas, desventajas y repercusiones de los cambios en el entorno sin afectar el contexto real [29].

Existen varias características mediante las cuales pueden ser clasificados los tipos de simulación, como son: la simulación estática, la cual representa un sistema en un instante de tiempo determinado; la simulación dinámica, la cual representa la evolución de un sistema en el tiempo; la simulación determinística, que no contiene ninguna variable aleatoria; la simulación aleatoria, la cual representa sistemas que contiene variables aleatorias; la simulación continua, donde el comportamiento del sistema cambia de forma continua en el tiempo; y la simulación discreta, donde el comportamiento del sistema cambia solo para instantes de tiempo concretos llamados eventos [28].

En el texto [23] se define en se definen tres fases que son requeridas para generar un buen entorno de simulación, las cuales se considera que aportaran fundamentos importantes para el desarrollo del proyecto.

- Fase de definición: en esta fase, el desarrollador identifica la información a ser procesada, el comportamiento y el rendimiento del sistema. La pregunta fundamental se centra sobre *el qué* del problema.
- Fase de desarrollo: en esta fase, el desarrollador, define el diseño y la implementación de los procedimientos, las estructuras, las funciones, y la realización de las pruebas, en donde la pregunta se centra en *el cómo* del problema.



- Fase de Mantenimiento: hace referencia a las adaptaciones requeridas a medida que evoluciona el entorno de simulación, en donde todo se centra en *el cambio*.

En este mismo texto se exponen unos pasos básicos se tendrán en cuenta en la metodología de simulación, estos pasos son:

2.1.1 Formulación del problema.

El objetivo de la simulación es la de analizar el efecto del ruido en recepción causados por efectos lineales y no lineales del enlace de fibra, cuando se utiliza detección coherente con receptores ópticos heterodinos, en donde se realizó una investigación previa que conto con los siguientes puntos importantes:

- Investigación sobre los receptores ópticos coherentes heterodinos (sección 1.2)
- Análisis de los ruidos inducidos por efectos lineales y no lineales (secciones 1.3 y 1.4), donde se determinó cuáles son los ruidos que más degradan las señales en el enlace de fibra óptica.

2.1.2 Generación de los escenarios de simulación.

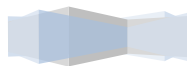
Con base en el modelo simplificado de red (figura 1.11), y teniendo en cuenta que se debe crear condiciones en la red para medir el efecto de los ruidos seleccionados en la sección 1.4, se determinan como parámetros a variar los siguientes:

- *En el transmisor:* Debe variarse el formato de modulación de la señal y el número de canales implementados
- *En el canal:* Debe variarse el nivel de compensación de dispersión cromática, la longitud del span y el número de amplificadores EDFA a utilizar
- *En el receptor:* El tipo de receptor debe estar acorde con el formato de modulación definido en el transmisor

Teniendo en cuenta estas variables, se plantean un escenario de simulación:

Escenario general:

Este escenario se implementará con el fin de analizar el desempeño frente al ruido de los receptores ópticos coherentes heterodinos cuando se implementan en una red WDM que tiene unas características deseadas en el ámbito comercial a nivel internacional, que comprenden entre otras el aumento de la tasa de transmisión y del número de canales implementados. Estos valores están definidos en la tabla 1.4, pero se realizarán las siguientes configuraciones para llevar a cabo las mediciones del efecto del ruido:



| PARAMETRO | VALORES |
|-------------------------------------|----------------------|
| Tasa de Transmisión | 10 Gbps |
| Canales implementados | 8, 16 y 32 canales |
| Longitud del span | 80Km, 90 Km y 100 Km |
| Nivel de compensación de dispersión | 70% y 100% |

Figura 2.1 Parámetros de los escenarios de simulación

Teniendo en cuenta lo expuesto en 1.4.8, el formato de modulación tendrá las siguientes configuraciones:

Configuración 1. Formato de modulación NRZ-OOK con Receptor Heterodino ASK Asíncrono.

Configuración 2. Formato de modulación NRZ-DPSK con Receptor Heterodino DPSK Asíncrono.

2.1.3 Plan de evaluación y pruebas.

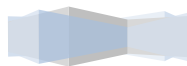
Mediante el diagrama de flujo de la figura 2.1 se explica el proceso de simulación a seguir, el cual servirá para evaluar el efecto del ruido en recepción en redes WDM, cuando se utiliza detección coherente con receptores ópticos heterodinios.

El análisis del ruido en recepción se lleva a cabo midiendo en el lado receptor las siguientes características del sistema:

1. La potencia de la señal será medida para verificar que el nivel de atenuación se mantenga en niveles que permitan realizar las demás mediciones
2. Otro efecto lineal a analizar es la dispersión (ambos tipos, CD y PMD), para identificar el efecto de los ruidos inducidos por la misma.
3. Se medirán efectos no lineales de la fibra, en especial la SPM y la XPM, para poder identificar que tanto están afectando el desempeño
4. Se hará un monitoreo especial de la potencia del Oscilador Local, para identificar la incidencia del ruido relativo de intensidad y del ruido de fase del láser.

Los resultados serán evaluados de acuerdo con los parámetros de desempeño mostrados a continuación:

- BER: $<10^{-9}$ (teórico), real alrededor de 10^{-16} .
- Factor Q: 6dB (teórico), real alrededor de 20dB.
- Sensibilidad del Receptor: mínimo de -14dBm.



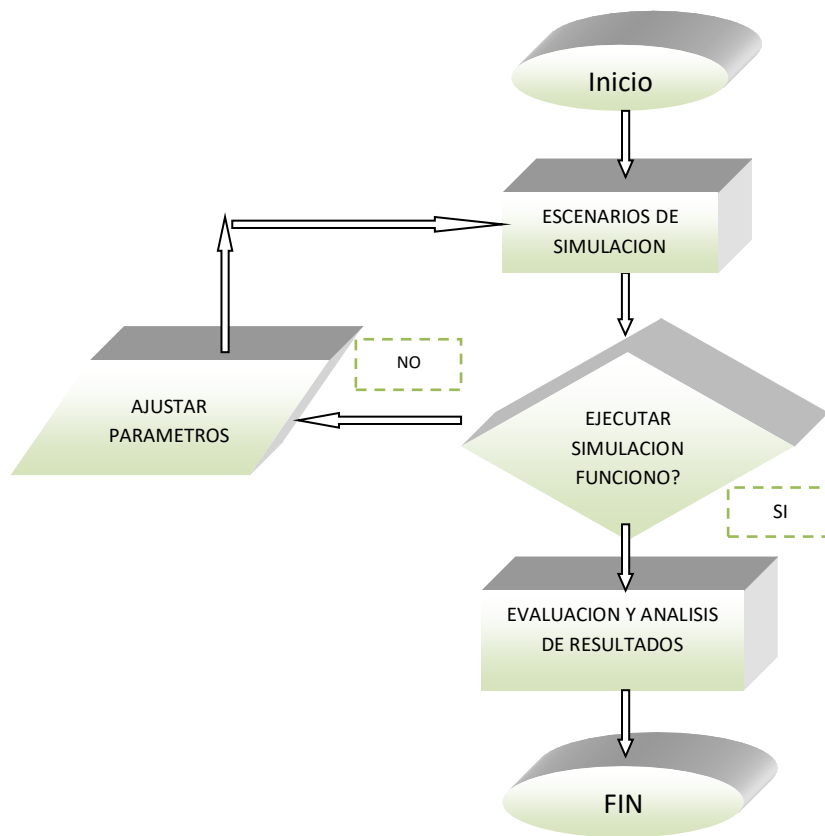


Figura 2.1 Diagrama de flujo para el entorno de simulación

2.2 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN [30]

La herramienta de simulación que se utilizara para el desarrollo de este proyecto es OptiSim, este entorno de simulación soporta el diseño y la evaluación de desempeño de las comunicaciones ópticas.

OptSim® tiene una amplia biblioteca de los componentes más utilizados en ingeniería de sistemas electro-ópticos. Esta biblioteca de componentes se actualiza continuamente a través de la investigación en curso y la colaboración de especialistas en simulación de renombre mundial, los cuales se encuentran en los principales centros de tecnología óptica en todo el mundo.

Además de la amplia biblioteca de componentes, OptSim incluye una muy usable interfaz (GUI), además de dos motores de simulación, capacidad de análisis de gran alcance de simulación de resultados, y herramientas de post-procesamiento.

En la guía de usuario de esta herramienta OptSim se definen dos modos de simulación que permitirán tener diferentes resultados de acuerdo con lo que se busca analizar. Por

un lado está el **modo bloque**, el cual corresponde a la técnica tradicional de simulación, y por el otro está el **modo muestra**, que es el más utilizado por recortar el tiempo de simulación, debido a que se pueden escoger diferentes tipos de variaciones para obtener los resultados requeridos.

OptSim también cuenta con dos técnicas de simulación, las cuales se describirán a continuación:

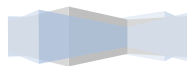
- **Técnica de Propagación Espectral (SPT)**

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. 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 [25].

- **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 [25].

Considerando lo anteriormente expuesto, para el desarrollo de este proyecto se utiliza el modo muestra, con la técnica VBS, dado que es la mejor forma de obtener los resultados de los diferentes escenarios de simulación.



CAPÍTULO 3. EVALUACION DEL EFECTO DEL RUIDO EN REDES WDM CON DETECCION COHERENTE.

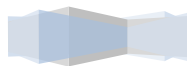
En este capítulo se presentan los resultados de simulación después de implementar el modelo simplificado de red que se presentó en la sección 1.5, con las respectivas configuraciones y escenarios de simulación especificados en el capítulo 2. Los parámetros se varían para provocar la presencia de los ruidos más relevantes, sobre los cuales se hizo el análisis de sus causas y consecuencias en la sección 1.4. Con base en el análisis del comportamiento de los diagramas del ojo y de los valores que toman los parámetros de desempeño, se determinan los tipos de ruido que hacen presencia en la red y sus efectos sobre la señal, así como las relaciones entre unos y otros bajo estas condiciones. Finalmente se demuestra cómo la dispersión cromática y el ruido de fase inducido por efectos no lineales afectan la señal por encima de cualquier otro ruido o efecto que pueda hacer presencia en el sistema.

Según lo establecido en el capítulo anterior, se creó un escenario general de simulación, en el cual se establecieron dos configuraciones (una para NRZ-OOK y la otra para NRZ-DPSK). Para evaluar el efecto de los ruidos en las dos configuraciones y teniendo en cuenta los ruidos seleccionados en la sección 1.4, se determinan como parámetros a variar los siguientes:

- En el transmisor: Debe variarse el formato de modulación de la señal y el número de canales implementados
- En el canal: Debe variarse el nivel de compensación de dispersión cromática, la longitud del span.
- En el receptor: El tipo de receptor debe estar acorde con el formato de modulación definido en el transmisor.

3.1 Formato de modulación NRZ-OOK con Receptor Heterodino ASK Asíncrono

En la figura 3.1, se aprecia la configuración 1 del escenario general de simulación (las figuras de todas las simulaciones se encuentran en el anexo), una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación, es su baja complejidad de implementación; en el transmisor se necesita un driver NRZ rectangular, un láser de modulación externa y un modulador MZ de seno cuadrado. En la sección del receptor coherente heterodino síncrono según la figura 1.5, es necesario un Oscilado local (láser), un acoplador, dos fotodiodos, un restador y un filtro. A la salida del sistema se utiliza un elemento de la herramienta llamado SCOPE, que realiza un tratamiento digital de la señal para obtener directamente los unos y ceros de la señal recibida y con esto poder hacer la comparación con la señal transmitida.



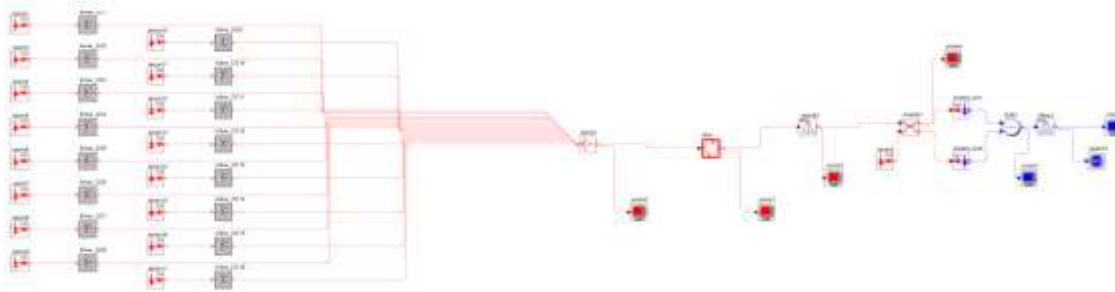


Figura 3.1 . Configuración 2 con 16 Canales (figura ampliada en el anexo)

De este primer grupo de simulaciones se puede observar que el cambio en la compensación de la dispersión cromática afecta profundamente la señal, convirtiendo a este efecto lineal en el más importante a tener en cuenta. Este afecta la señal en todos los casos en donde no se hace compensación del 100%, colocando la BER y el factor Q por debajo de las referencias definidas en el capítulo 2, como se muestra en la figura 3.2:

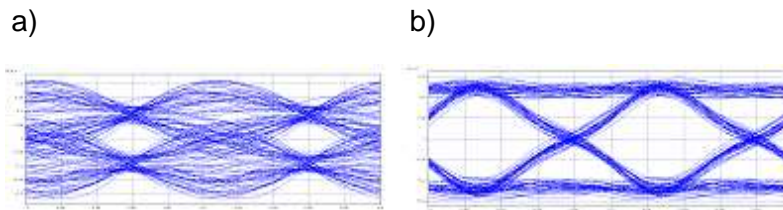


Figura 3.2 Sistema NRZ-OOK con 8 canales, 7 span y: a) Compensación del 70% de la CD. b) Compensación del 100% de la CD

Debido a la fuerte influencia que genera la **dispersión cromática** sobre el sistema, que en ciertos casos no va a permitir ver los efectos del ruido sobre la señal, se obviarán en adelante los resultados obtenidos cuando se compensa el 70% de la dispersión cromática. Sin embargo estos quedan disponibles para el lector en el **anexo**, donde se incluyeron todos los resultados de simulación obtenidos.

Para evaluar el efecto del **ruido de fase del láser**, se realizaron variaciones de un parámetro del láser llamado FWHM, pero los resultados obtenidos en la simulación **no tuvieron relevancia**, no hubo cambios significativos en los valores de los parámetros de desempeño y los diagramas del ojo obtenidos fueron los mismos para todos los escenarios de simulación definidos en el capítulo 2, llevando a concluir que el efecto del ruido de fase del láser es irrelevante frente a los efectos de otros ruidos presentes en recepción.

Por otro lado, para observar los efectos del **ruido de amplificación**, se varía el número de span para los diferentes grupos de canales implementados, ya que con el aumento del número de span, se incrementa el número de amplificadores y por tanto, en teoría, debe

incrementarse el ruido de amplificación; los resultados obtenidos cuando se utilizan 8, 16 y 32 canales con una compensación del 100% de la CD fueron los siguientes:

En la figura 3.3 y la tabla 3.1 se pueden observar que en enlace de 8 canales, al disminuir el numero de span de el enlace, la señal se va deteriorando, y se ve que es muy abrupta cuando se pasa de 6 a 5 span, hasta el punto de estar muy por debajo de la BER optima del enlace.

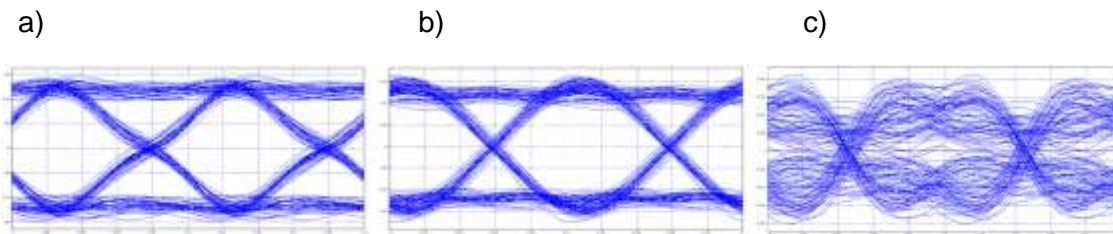


Figura 3.3 Sistema NRZ-OOK con 8 canales y: a) 7 span de 80km. b) 6 span de 90km. c) 5 span de 100Km.

| | 7 Span de 80 km | 6 Span de 90 km | 5 Span de 100 km |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| BER | 2,169200E-36 | 4,661170E-32 | 3,773600E-03 |
| Factor Q dB | 22,108318 | 21,386357 | 8,564157 |
| OSNR | 51.60 | 52.18 | 51.05 |

Tabla 3.1 Resultados de la variación de Span en enlace de 8 canales, con una compensación del 100%.

De acuerdo con [31], los diagramas del ojo de la figura 3.3 muestran que para el caso de 5 span el efecto de la atenuación es bastante elevado y deteriora la señal, mostrando que los cambios en la longitud del span tienen un efecto más fuerte sobre el sistema que los cambios en la longitud del enlace (con 7 y 6 span se alcanzan distancias más largas del enlace que con 5 span); Esto demuestra que **el ruido de amplificación**, que afecta a los sistemas a medida que se incrementa el número de span y, por tanto, el número de amplificadores, **no genera mayores efectos sobre el sistema**, como si lo hace la atenuación.

Por otro lado los diagramas muestran que, a pesar de que la BER para 6 y 7 span es muy baja, la coincidencia de unos y ceros no es perfecta, y se ven pequeños desfases aleatorios que harían pensar en la presencia de **ruido de fase**, que al haberse descartado ya que sea producido por el láser, podría decirse que es inducido por efectos no lineales de la fibra, como la SPM y la XPM.

Para 16 canales y compensación del 100% de la dispersión, Los resultados del enlace que se puede apreciar en la figura 3.4 y la tabla 3.2, ocurre algo muy similar al enlace de

8 canales, la señal se va deteriorando, y cuando se pasa de 6 a 5 span la BER cae abruptamente.

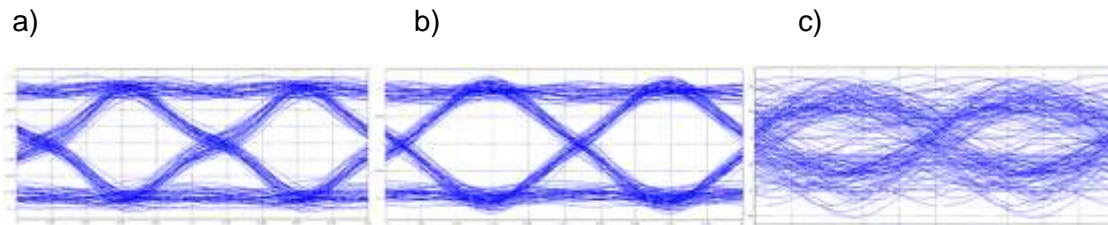


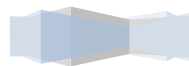
Figura 3.4 Sistema NRZ-OOK con 16 canales y: a) 7 span de 80km. b) 6 span de 90km. c) 5 span de 100Km.

| | 7 Span de 80 km | 6 Span de 90 km | 5 Span de 100 km |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| VER | 3,666550E-26 | 4,661170E-27 | 0,006364 |
| Factor Q dB | 20,445654 | 20,681475 | 7,493640 |
| OSNR | 51,26 | 51,12 | 51,08 |

Tabla 3.2 Resultados de la variación de Span en enlace de 16 canales.

En este caso en que se utilizan 16 canales, el comportamiento de los diagramas del ojo y de los parámetros de desempeño es muy parecido al caso en que se utilizan 8 canales, así que el efecto del ruido es el mismo. Solamente cabe señalar que el incremento de la BER, comparándola con la del sistema de 8 canales, muestra que el aumento de los canales tiene un efecto sobre el desempeño, y por tanto, debe existir un ruido relacionado con éste fenómeno que está afectando el sistema, lo cual será analizado un poco más adelante en esta sección, cuando se contrasten los diagramas del ojo de acuerdo con el incremento de canales y no con el incremento del número de span.

Para 32 canales y compensación del 100% de la dispersión cromática, se muestra a continuación los resultados de simulación como se pueden ver en la figura 3.5 y tabla 3.3, donde se puede apreciar que al ampliar la longitud del span utilizando cada vez menos amplificadores sin modificar la longitud del enlace, se deteriora la señal paulatinamente, como ocurrió en los casos anteriores con 8 y 16 canales, aunque ésta vez la BER para 6 y 7 span no es tan baja como sucedió con la implementación de menos canales.



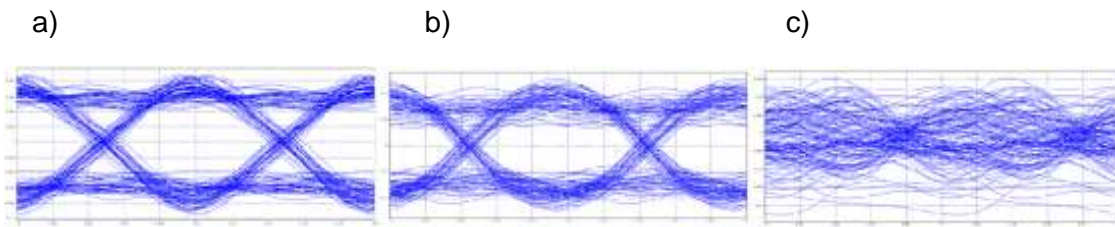


Figura 3.5 Sistema NRZ-OOK con 32 canales y: a) 7 span de 80km. b) 6 span de 90km. c) 5 span de 100Km.

| | 7 Span de 80 km | 6 Span de 90 km | 5 Span de 100 km |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| VER | 5.32E-16 | 7.29E-9 | 0.02275 |
| Factor Q dB | 18,267300 | 15,066000 | 6,020 |
| OSNR | 51,224 | 51,16 | 51 |

Tabla 3.3 Resultados de la variación de Span en enlace de 32 canales.

Con 8 canales y 5 span de 100Km como se ve en la figura 3.6, que es la configuración que dio mejor resultado con 5 span, no se cumplen los mínimos establecidos para la BER y el factor Q. La BER sube a niveles inaceptables del orden de 10^{-3} y el factor Q baja a un poco mas de 8 dB, muy cercano al mínimo que reporta la herramienta, y muy lejos de los 25dB de referencia.

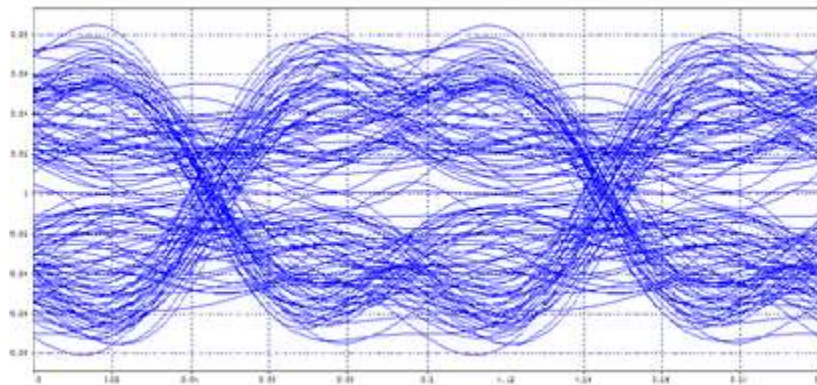


Figura 3.6 . Sistema NRZ-OOK de 8 canales con 5 span de 100Km

En la simulación también se puede observar los efectos que tiene el aumento de canales en la señal. Para este caso de modulación NRZ-OOK se construyeron y configuraron enlaces de 8, 16 y 32 canales, cuyos resultados se verán a continuación.

Para un enlace de 7 span el resultado de simulación cuando se aumenta los canales en la figura 3.7, presenta un patrón consistente, donde a medida que se incrementan de 8, a 16 y hasta 32, la señal muestra un deterioro.

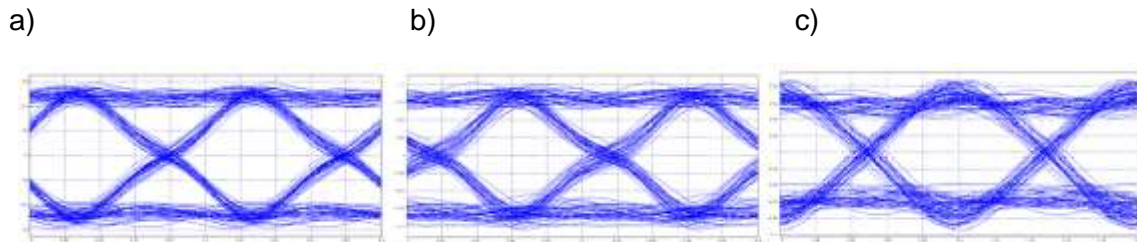


Figura 3.7, Sistema NRZ-OOK de 7 span de 80km y: a) 8 canales. B) 16 canales. C) 32 canales.

Cuando se utilizan 6 span, el resultado de la simulación mostrado en la figura 3.8 deja ver que el deterioro de la señal aumenta cuando hay un incremento de los canales, lo cual se hace crítico con 32 canales, ya que la señal alcanza una BER del orden de 10^{-9} que es el mínimo de referencia, pero es muy alta comparada con los otros casos que baja al orden de 10^{-32} y 10^{-27} .

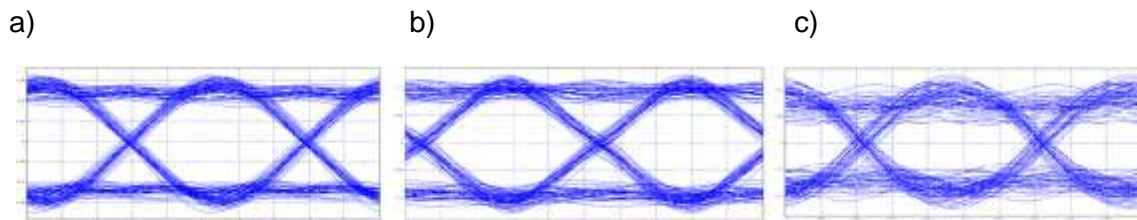


Figura 3.8 sistema NRZ-OOK de 6 span de 90km y: a) 8 canales. B) 16 canales. C) 32 canales.

Pero por otro lado, cuando se utilizan 5 span, con 8, 16 y 32 canales, los resultados de simulación en la figura 3.9, se aprecia una señal muy deteriorada que no cumple con los mínimos de referencia.

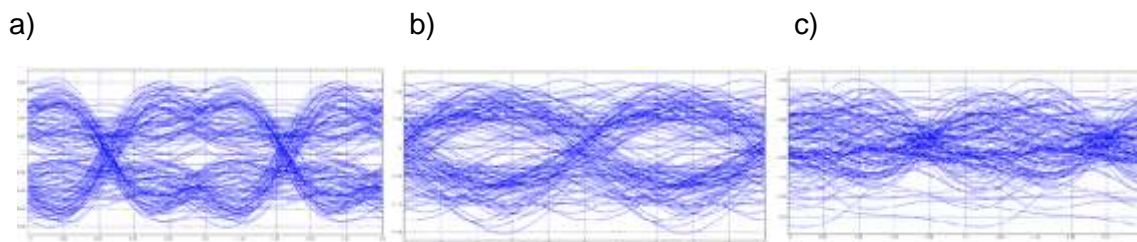


Figura 3.9 sistema NRZ-OOK de 5 span de 100km y: a) 8 canales. B) 16 canales. C) 32 canales.

La caída del desempeño cuando se aumenta el número de canales y la forma de los diagramas del ojo, donde se ven pequeños desfases aleatorios, demuestra la presencia de **ruido de fase inducido por XPM**. Se puede observar en los diagramas la diferencia

de fase que eleva la BER fuertemente. Esto lleva a que con 32 canales el desempeño en todos los casos sea muy bajo en comparación con las demás configuraciones.

Conclusiones

De acuerdo con el análisis de resultados, se pueden sacar las siguientes conclusiones sobre el efecto del ruido:

- La dispersión cromática genera un efecto muy significativo sobre la señal. Cuando se presenta un leve cambio de 100% a 70% en el nivel de compensación de la dispersión, se genera un deterioro abrupto de la señal que lleva a concluir que en todo caso siempre debe buscarse un nivel de 100% de compensación de la dispersión cromática.
- Si se hace un ejercicio comparativo con investigaciones que trabajan con tasas de transmisión a 2.5Gbps (específicamente en [14]), se puede notar que los cambios en la compensación de la dispersión no deterioran la señal como se dio en este trabajo; esto permite concluir que este fuerte impacto de la dispersión cromática se debe al aumento de la tasa de transmisión de bits de 2.5 a 10Gbps, y que la detección coherente puede ser más sensible a la dispersión cromática.
- Con el aumento del número de canales y de la longitud de los span, la dispersión cromática es casi imposible de compensar, y la atenuación de la señal se convierte en el factor más importante de la caída de los valores de los parámetros de referencia, principalmente para el caso de 32 canales con 5 y 6 span.
- El efecto que generan los ruidos típicos estudiados están subordinados totalmente a la dispersión cromática. En teoría el efecto del ruido producido por los amplificadores subordina a otros como el ruido de disparo, el ruido cuántico, entre otros. Lo que muestran los resultados es que el aumento del número de amplificadores no genera un efecto negativo en la señal, lo cual lleva a pensar que el efecto del ruido de amplificación bajo estas condiciones de velocidad de transmisión, tipo de fibra y longitud del enlace, pasa a un segundo plano, donde la dispersión cromática y la atenuación de la señal dominan completamente sobre la señal recibida. Esto se debe a que la recepción coherente presenta un buen desempeño frente al ruido de amplificación y todos los demás subordinados a él, pero presenta debilidades frente a la dispersión cromática y a los ruidos inducidos por efectos no lineales.
- Cuando se utilizan 32 canales, la señal se vuelve muy sensible a los cambios en las características del enlace. La compensación de la dispersión cromática se hace muy difícil y el aumento de la longitud del span genera un decremento de la BER. La disminución en el espaciado de los canales genera unas consecuencias importantes en el desempeño del sistema que deben tenerse en cuenta, lo cual permite concluir que la XPM está induciendo ruido de fase no lineal que afecta la señal recibida.

- El ruido de **fase del láser** no presenta ningún efecto sobre el sistema de detección coherente con receptor heterodino y modulación de amplitud, pero la presencia evidente de ruido de fase demuestra que éste es inducido por efectos no lineales. Esto también refuerza la afirmación sobre la fortaleza de la detección coherente frente a ruidos típicos como el ruido de fase del láser entre otros, pero su debilidad frente a la dispersión cromática y los ruidos inducidos por efectos no lineales de la fibra.

3.2 Formato de modulación NRZ-DPSK con Receptor Heterodino DPSK Asíncrono.

Al igual que en el sistema NRZ-OOK, a una velocidad de 10Gbps la dispersión cromática afecta profundamente el desempeño del sistema, obligando a que se haga una compensación del 100% de la dispersión para que exista la posibilidad de alcanzar un buen comportamiento de los parámetros de desempeño. En la figura 3.10 se puede observar la diferencia entre compensar el 70% y el 100% cuando se implementan 8 canales con 7 span:

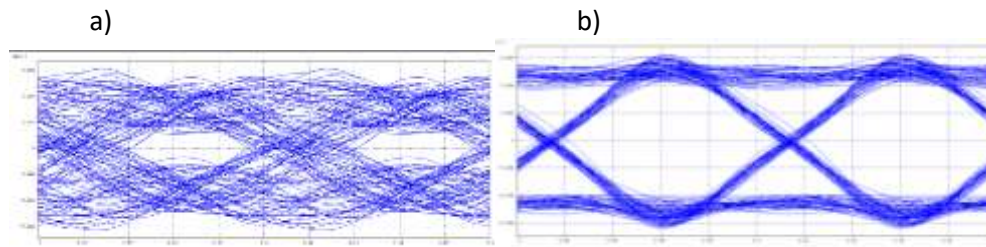


Figura 3.10 Sistema NRZ-DPSK con 8 canales, 7 span y: a) Compensación del 70% de la CD. B) Compensación del 100% de la CD

Debido a la fuerte influencia que genera la dispersión cromática sobre el sistema, que en ciertos casos no va a permitir ver los efectos del ruido sobre la señal, se obviarán en adelante los resultados obtenidos cuando se compensa el 70% de la dispersión cromática. Sin embargo estos quedan disponibles para el lector en el **anexo**, donde se incluyeron todos los resultados de simulación obtenidos.

Para evaluar el efecto del **ruido de fase del láser**, se realizaron variaciones de un parámetro del láser llamado FWHM, pero los resultados obtenidos en la simulación **no cambiaron en nada**, no hubo cambios de ningún tipo en los valores de los parámetros de desempeño y los diagramas del ojo obtenidos fueron los mismos para todos los escenarios de simulación definidos en el capítulo 2, llevando a concluir que el efecto del ruido de fase del láser es irrelevante frente a los efectos de otros ruidos presentes en recepción.

Por otro lado, para observar los efectos del **ruido de amplificación**, se varía el número de span para los diferentes grupos de canales implementados, ya que con el aumento del número de span, se incrementa el número de amplificadores y por tanto, en teoría, debe incrementarse el ruido de amplificación; los resultados obtenidos cuando se utilizan 8, 16 y 32 canales con una compensación del 100% de la CD fueron los siguientes:

En la figura 3.11 y la tabla 3.4 se pueden observar que en enlace de 8 canales, al igual que en los resultados de la modulación NRZ-OOK, al disminuir el número de span del enlace, la señal se va deteriorando, y se ve que el es muy fuerte cuando se pasa de 6 a 5 span, hasta el punto de estar muy por debajo de la BER óptima del enlace.

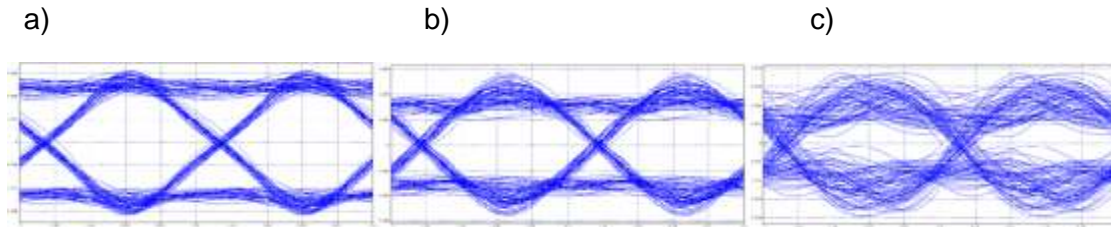


Figura 3.11 Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y: a) 7 span de 80km. b) 6 span de 90km. c) 5 span de 100Km.

| | 7 Span de 80 km | 6 Span de 90 km | 5 Span de 100 km |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| BER | 4,400087E-39 | 1,039090E-22 | 2,144000E-04 |
| Factor Q dB | 22,532800 | 19,848014 | 10,928800 |
| OSNR | 51,65 | 51,62 | 51,3 |

Tabla 3.4 resultados de la variación de Span en enlace de 8 canales.

De acuerdo con [31], los diagramas del ojo muestran una fuerte influencia de la atenuación cuando se utilizan 5 span (mayor longitud del span, menor longitud del enlace), aunque en éste caso el efecto de la atenuación no es de la misma magnitud que cuando para el caso en que se usó modulación NRZ-OOK en la sección anterior.

Para 16 canales y compensación del 100% de la dispersión, Los resultados del enlace que se puede apreciar en la figura 3.12 y la tabla 3.5, ocurre algo muy similar al enlace de 8 canales NRZ-DPSK, la señal se va deteriorando, y en cuando se pasa de 6 a 5 span la BER cae abruptamente.

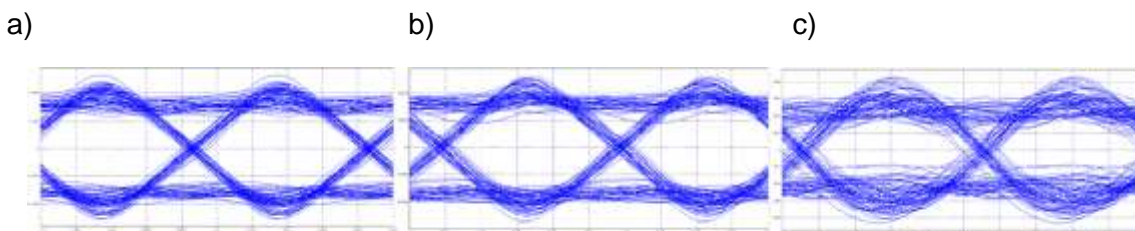


Figura 3.12 Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y: a) 7 span de 80km. b) 6 span de 90km. c) 5 span de 100Km.



| | 7 Span de 80 km | 6 Span de 90 km | 5 Span de 100 km |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| BER | 1,616190E-26 | 2,527800E-23 | 4,109330E-07 |
| Factor Q dB | 20,618844 | 19,947800 | 13,894400 |
| OSNR | 51,6 | 51,44 | 51,21 |

Tabla 3.5 Resultados de la variación de Span en enlace de 16 canales.

Nuevamente el diagrama del ojo muestra el efecto de la atenuación sobre la señal con 5 span, aunque la BER es un poco mejor que con 8 canales. Sin embargo, el efecto de la atenuación sobre la señal a 5 span sigue siendo menos lesivo que en el formato de modulación usado en la sección anterior.

Para 32 canales y compensación del 100% de la dispersión, al obtener los resultados del enlace que se ilustran en la figura 3.13 y tabla 3.6, se puede apreciar que al ampliar la longitud del span utilizando cada vez menos amplificadores sin modificar la longitud del enlace, se deteriora la señal paulatinamente.

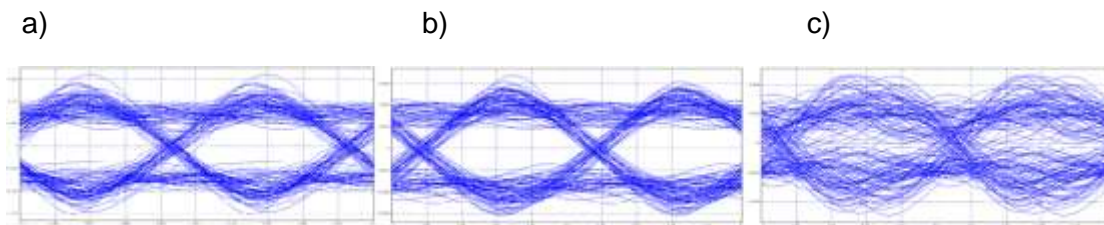


Figura 3.13 Sistema NRZ-DPSK con 32 canales y: a) 7 span de 80km. b) 6 span de 90km. c) 5 span de 100Km.

| | 7 Span de 80km | 6 Span de 90km | 5 Span de 100km |
|-------------|----------------|----------------|-----------------|
| BER | 6,256100E-08 | 5,785450E-09 | 6,082000E-03 |
| Factor Q dB | 14,474500 | 15,214000 | 7,998500 |
| OSNR | 51,30 | 51,05 | 50,8 |

Tabla 3.6 Resultados de la variación de Span en enlace de 8 canales.

Los resultados obtenidos obligan a un análisis detenido, debido a que no concuerdan un poco con lo esperado desde el punto de vista teórico. En primer lugar el aumento de la longitud del span afecta considerablemente el desempeño, pero dependiendo del número de canales que se utilicen, el efecto es diferente.



Cuando se usan 8 canales, hay una subida de la BER desde 10^{-39} hasta 10^{-22} y 10^{-4} , pero cuando se usan 16 canales el aumento de la BER es menos abrupto, pasando de 10^{-27} a 10^{-23} y 10^{-7} .

De esta forma, se obtiene un mejor comportamiento de la BER cuando se utilizan 6 span con 16 canales que con 8 canales, por una diferencia muy mínima. Esto muestra que el sistema bajo modulación NRZ-DPSK es altamente sensible a cambios en la longitud del span cuando se usan pocos canales, pero no es tan sensible cuando el espaciamiento entre canales se reduce. Esto lleva a concluir que el efecto del **ruido inducido por XPM**, que se presenta cuando se aumenta el número de canales, domina sobre el efecto de la atenuación que pueda generar el aumento de la longitud del span.

Por otro lado, cuando se aumenta el número de canales, baja el desempeño del sistema, haciéndolo sensible también a la reducción del espaciamiento de los canales.

Para un enlace de 7 span el aumento de los canales al igual que en la modulación NRZ-OOK como se puede ver en la figura 3.14, se presenta un patrón de deterioro de la señal a medida que se aumentan los canales de 8, a 16, a 32.

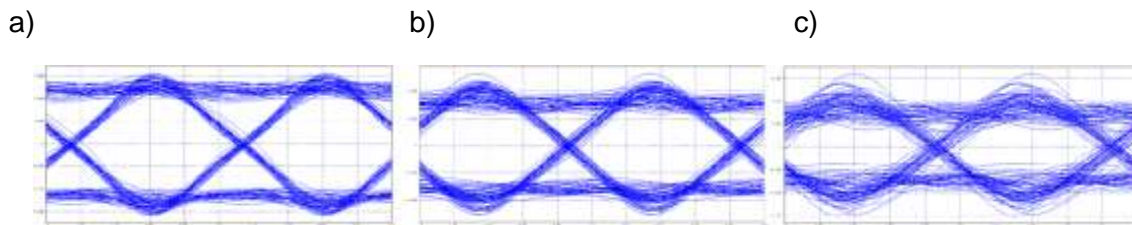


Figura 3.14 Sistema NRZ-DPSK de 7 span de 80km y: a) 8 canales. b) 16 canales. c) 32 canales.

En la figura 3.15 cuando se utilizan 6 span, podemos apreciar el deterioro de la señal es mas marcado comparado y se hace crítico con 32 canales, ya que la señal alcanza una BER del orden de 10^{-9} que es el mínimo de referencia.

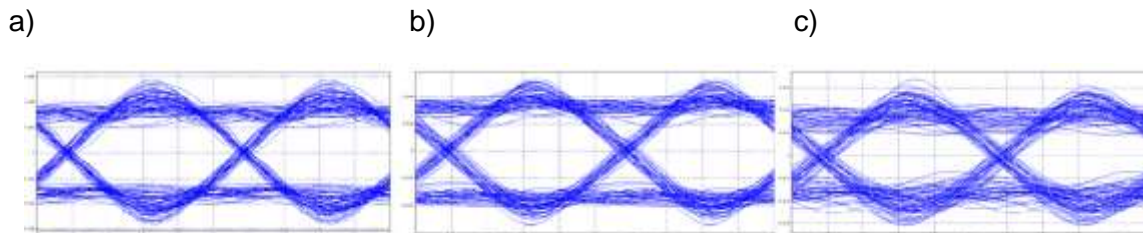


Figura 3.15 sistema NRZ-DPSK de 6 span de 80km y: a) 8 canales. b) 16 canales. c) 32 canales.

Pero por otro lado, los resultados de simulación en la figura 3.16 cuando se utilizan 5 span, con 8, 16 y 32 canales se tiene una señal no tan deteriorada comparada con la del enlace NRZ-OOK con 5 span pero tampoco cumple con los mínimos establecidos.

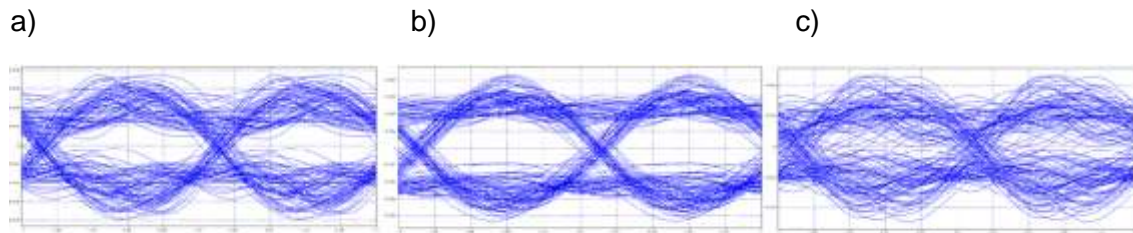


Figura 3.16 sistema NRZ-DPSK de 5 span de 100km y: a) 8 canales. b) 16 canales. c) 32 canales.

Comparando estos resultados con los obtenidos para NRZ-OOK, se puede ver que el sistema NRZ-DPSK es mucho más sensible a los cambios en la longitud del span, pero con el valor apropiado para esta longitud, se alcanza mejor desempeño que cuando se utiliza NRZ-OOK. Por otro lado, el aumento del número de canales no afecta el desempeño del sistema NRZ-DPSK tanto como lo hace con NRZ-OOK, ya que se pudo observar que con el uso de 32 canales, aunque no se alcanzan los valores mínimos para los parámetros de desempeño, la señal NRZ-DPSK no se deteriora tanto como la señal NRZ-OOK, lo que muestra menor sensibilidad al aumento de canales.

Por último se observó que los diagramas del ojo de las señales NRZ-DPSK, en las mejores condiciones, son mejores que los de las señales NRZ-OOK, pero cuando se cambian algunos parámetros, principalmente la longitud del span, los diagramas de las señales NRZ-DPSK dejan de ser mejores, y muestran ciertos cambios de la fase, lo cual muestra que los ruidos no lineales de fase inducidos por efectos no lineales afectan la señal NRZ-DPSK. Por esta razón se realizaron simulaciones bajo ciertas condiciones para detectar la presencia de efectos no lineales en el sistema, en concreto de la SPM; al igual que en el sistema NRZ-OOK, aquí se puede concluir que la presencia de un desfase de la señal que la deteriora a medida que aumenta el número de canales, se debe a la presencia de **ruido de fase no lineal inducido por XPM**.

Conclusiones

- Los sistemas NRZ-DPSK se ven fuertemente afectados por la dispersión cromática, ya que este efecto lineal por si mismo genera deterioro de la señal, pero también genera **ruidos no lineales inducidos por XPM o SPM**. En todo caso, al igual que con los sistemas NRZ-OOK, debe buscarse siempre que haya compensación del 100% de la Dispersión Cromática para que sea posible que el sistema actúe sobre los mínimos valores de los parámetros de rendimiento

- El aumento de la longitud del span afecta los sistemas NRZ-DPSK en menor proporción que los sistemas NRZ-OOK, sin que esto niegue que el aumento de éste parámetro genera incrementos grandes de la BER, deteriorando el desempeño del sistema. En todos los casos, la utilización de 5 span de 100Km colocó la BER por encima de 10^{-9} y el factor Q por debajo del mínimo establecido en el capítulo 2, lo cual muestra que estos sistemas son muy sensibles al aumento de la longitud del span. A pesar de éstas condiciones, el sistema NRZ-DPSK de 8 canales con 7 span presenta mejor desempeño que el sistema NRZ-OOK bajo las mismas condiciones.
- Nuevamente el aumento del número de canales genera una caída considerable en el desempeño, llevando a que con el uso de 32 canales fuera imposible alcanzar los valores esperados de la BER y el factor Q. En el sistema NRZ-OOK con 7 span se logró una BER de 10^{-16} , que por lo menos está un poco por debajo del valor máximo esperado, pero en el sistema NRZ-DPSK no se logró esta condición en ningún caso. Cuando se implementaron 16 canales el desempeño no fue tan bueno como con 8 canales, pero el sistema se hizo menos sensible a los cambios en la longitud del span. Esto lleva a concluir que la presencia de **ruido de fase no lineal inducido por XPM impone un límite en el número de canales que se pueden implementar** en sistemas con tasa de transmisión de 10Gbps bajo las condiciones de red definidas en el presente trabajo.

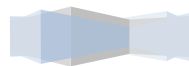
3.3 Analisis de efectos no lineales

Para detectar si la XPM y SPM generaban algún efecto, se consideró el enlace de 16 canales con 1 span de 80 km, tasa de transmisión de 10Gbps y amplificadores EDFA de ganancia a 3dB, tanto para el formato de modulación NRZ-OOK como el de NRZ-PSK, ya que ésta configuración presenta un aceptable rendimiento que dará una visión mas real de los efectos que la SPM generan en la señal.

El objetivo principal de ésta sección es corroborar con unas simulaciones especiales, que los efectos no lineales de la fibra SPM y XPM **inducen ruido no lineal de fase**, y verificar su efecto sobre la señal, pero ésta vez (y sólo en ésta sección) de manera aislada de los demás ruidos.

3.3.1 Analisis XPM

Para observar los efectos de la XPM se implementaron 16 canales NRZ-OOK donde se intercalaron potencias de 0dBm, a -10dBm y se varió la dispersión de 0 CD a 17 CD, como se puede observar el espectro en transmisión en la figura 3.16:



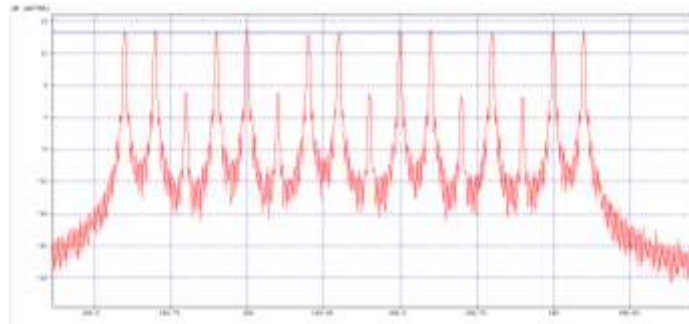


Figura 3.17 Señal transmitida 16 canales NRZ-OOK y potencias de 0dBm y 10dBm.

Variando la dispersión de la fibra y sobreponiendo en la figura 3.17 el espectro con 0 CD(verde) y 17 CD(rojo) se puede observar que las variaciones no son muy notables.

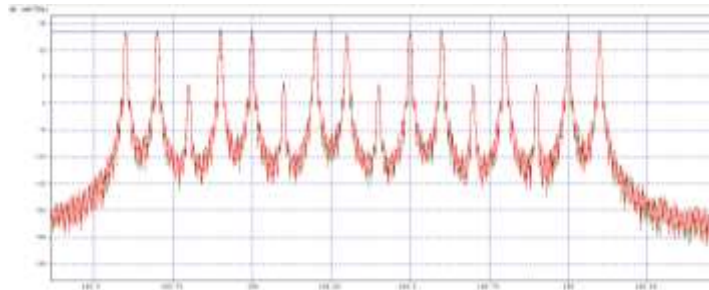


Figura 3.18 Señal a 80 Km con 16 canales NRZ-OOK y potencias de 0 dBm y 10 dBm.

Observando el espectro de un solo canal en la figura 3.18, podemos ver con mas detalle el efecto de la XPM. El espectro verde muestra el canal que paso por 0 CD de la fibra y en rojo se puede ver el canal que paso por 17 CD de la fibra, hay una muy pequeña diferencia entre estos dos espectros causada por la XPM.

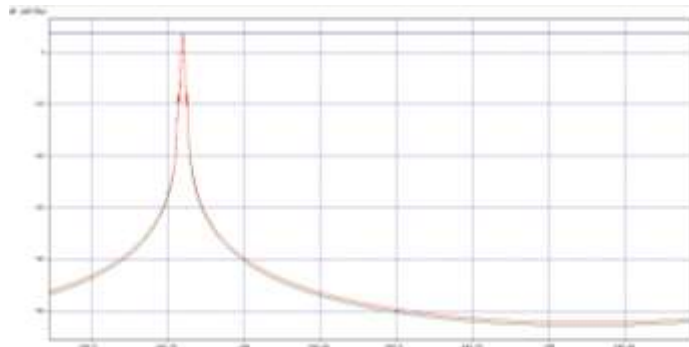
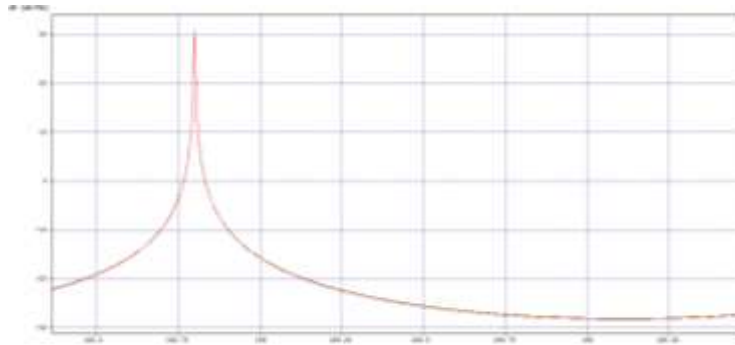


Figura 3.19 Señal NRZ-OOK demultiplexada, antes de entrar al receptor

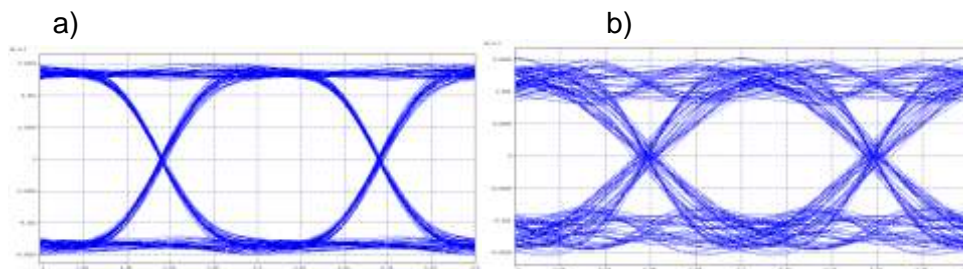


En la figura 3.19 se puede ver la señal de un solo canal dentro del receptor coherente, las señales que pasaron por la fibra de 0 CD y 17 CD aun siguen sobrepuestas pero la diferencia es nula.



Figuras 3.20 Señal demultiplexada después de pasar por el receptor coherente.

A pesar de las diferencias en el espectro, que no permiten ver claramente si la XPM está induciendo ruido sobre la señal, el diagrama del ojo muestra el deterioro de la señal con el aumento de la dispersión cromática, lo cual combinado con el deterioro de la señal que se observó en la sección 3.1 cuando se aumentan los canales, lleva a concluir que la XPM si induce ruido de fase.



Figuras 3.21 Diagrama del ojo para NRZ-OOK de 16 canales con: a) 0 CD. b) 17 CD.

| | CD 0dB | CD 17dB |
|-----------------------------------|---------|-------------|
| VER | 1 E-40 | 5,5753 E-19 |
| Factor Q (DB) | 31,22 | 19,1280 |
| OSNR (dB) antes del receptor | 53,4695 | 53,086 |
| Potencia (dBm) antes del receptor | -7,3497 | -7,3813 |
| OSNR (dB) antes del receptor | 51,3252 | 51 |
| Potencia (dBm) antes del receptor | -0,036 | -0,0709 |

Tabla 3.7 Resultados de la variación de la dispersión cromática de la fibra, en un enlace NRZ-OOK de 16 canales.

Para observar los efectos de la XPM sobre el sistema NRZ-DPSK, y teniendo en cuenta lo que se hizo con la modulación NRZ-OOK, se realizaron simulaciones con un enlace de 16 canales NRZ-DPSK a los cuales se les intercalaron potencias de 0dBm, a -10dBm y se varió la dispersión de 0 CD a 30 CD para obtener los siguientes resultados:

Espectro transmitido

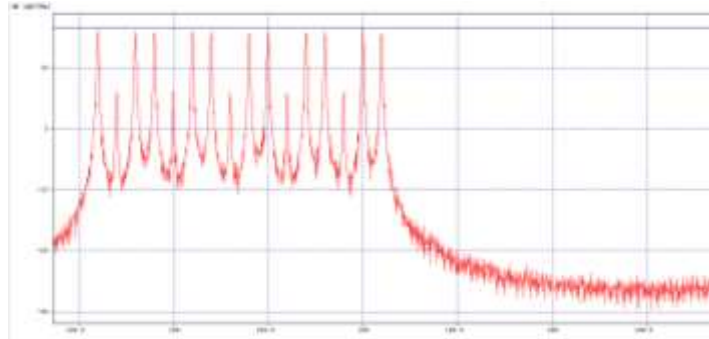


Figura 3.22 Señal de transmitida 16 canales NRZ-DPSK y potencias intercaladas.

Variando la dispersión de la fibra y sobreponiendo en la figura 3.23 el espectro con 0 CD(rojo) y 30 CD(verde) se puede observar que las variaciones son casi nulos.

El espectro recibido fue:

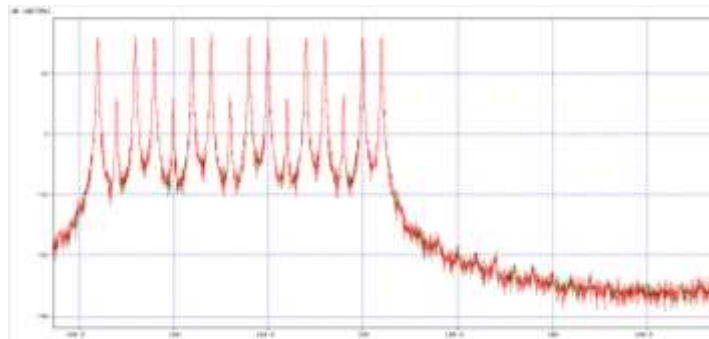
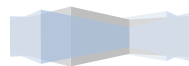


Figura 3.23 Señal a 80Km con 16 canales NRZ-DPSK y potencias intercaladas.

Observando el espectro de un solo canal en la figura 3.23, podemos ver con mas detalle el efecto de la XPM en NRZ-DPSK. El espectro rojo nos muestra el canal que paso por 0 CD de la fibra y en verde el canal que paso por 30 CD de la fibra. Se puede ver que hay una muy pequeña diferencia entre estos dos espectros causada por la XPM.



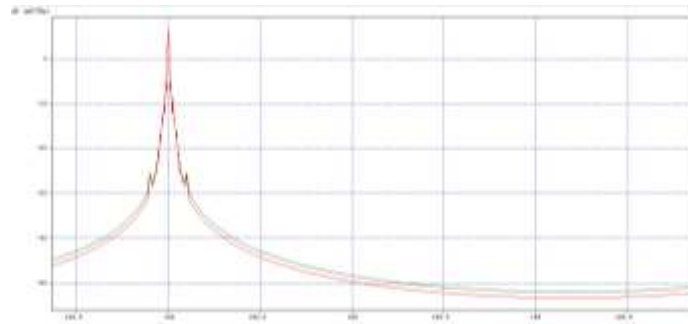
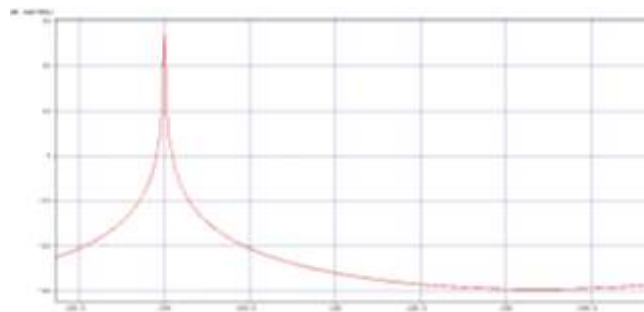
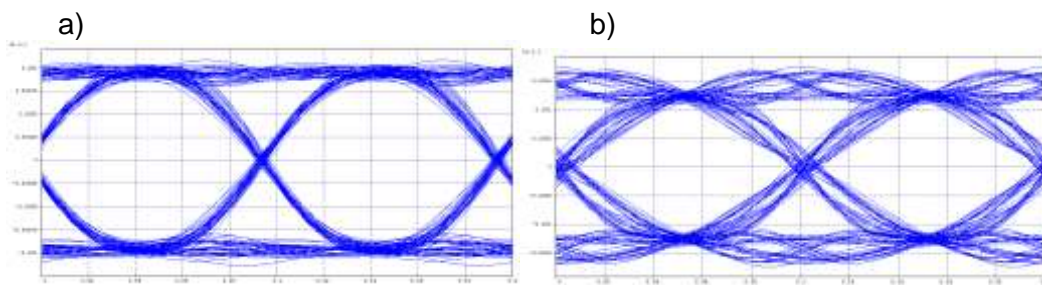


Figura 3.24 Señal NRZ-DPSK demultiplexada, antes de entrar al receptor coherente

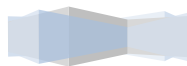
En la figura 3.25 se puede ver la señal de un solo canal dentro del receptor coherente, las señales que pasaron por la fibra de 0 CD y 30 CD aun siguen superpuestas pero la diferencia es nula.



Figuras 3.25 Señal demultiplexada NRZ-DPSK, después de pasar por el receptor coherente.



Figuras 3.26 Diagrama del ojo de un enlace NRZ-DPSK de 16 canales con: a) señal con 0 CD. b) 17 CD.



| | CD 0dB | CD 17dB |
|----------------------------------|--------|----------|
| VER | 1 E-40 | 1 E-40 |
| Factor Q (DB) | 28 | 28,121 |
| OSNR (dB) antes del receptor | 53,8 | 54,45188 |
| Potencia (dBm)antes del receptor | -8,08 | -7,99 |
| OSNR (dB) antes del receptor | 51,86 | 52,1334 |
| Potencia (dBm)antes del receptor | -0,968 | -0,898 |

Tabla 3.8 Resultados de la variación de la dispersión cromática de la fibra, en un enlace NRZ-DPSK de 16 canales.

Estos resultados un poco confusos muestran una BER del mismo valor para ambos valores de dispersión, pero el diagrama del ojo muestra el desfase generado por el aumento de la CD. Por tanto se concluye que **la XPM induce ruido de fase a la señal.**

3.3.2 Analisis SPM

a) Para NRZ-OOK.

Para el análisis de la SPM se varió la potencia de los amplificadores EDFA y la dispersión cromática, ya que como se pudo ver en el capítulo 1 estos son los principales factores que llevan a que éste efecto no lineal induzca ruido de fase. Primero se tomaron 16 canales NRZ-OOK para un span de 80Km ya que con este enlace se obtuvo resultados aceptables y se consiguieron los siguientes resultados que se pueden apreciar en la figura 3.27:

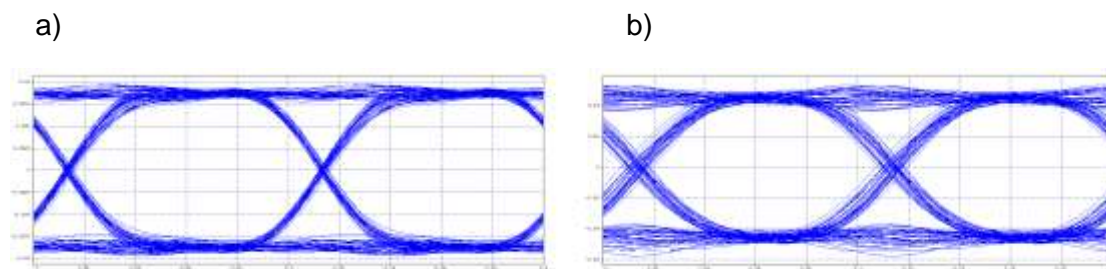
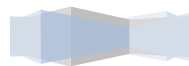


Figura 3.27 Sistema de 16 canales NRZ-OOK de un span de 80 km con ganancia de amplificador EDFA de: a) 0dB y b) 20dB.



| | EDFA 0dB | EDFA 20dB |
|----------------|-----------|-----------|
| Jitter | 0,0198435 | 0,0227 |
| BER | 1,00E-40 | 1,00E-33 |
| Factor Q (dB) | 30.47 | 26.35 |
| OSNR(dB) | 51,71 | 51,7976 |
| Pot señal(dBm) | -0,426 | -0,381 |

Tabla 3.9 Resultados de la variación de la ganancia del EDFA en un enlace de 16 canales con 1 span de 80 km.

El aumento de la potencia de los EDFA demuestra aquí claramente que la SPM induce ruido de fase sobre el sistema.

Por otra parte, se verifica si el efecto de la dispersión cromática combinado con la SPM mediante el régimen de dispersión normal ($CD < 0$) y el régimen de dispersión anómalo ($CD > 0$), genera cambios en los parámetros de monitoreo óptico.

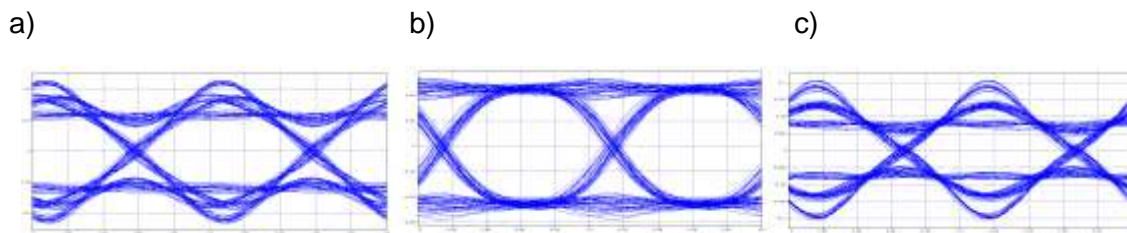
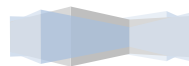


Figura 3.28 Sistema NRZ-OOK con 8 canales y 1 span de 80km, con dispersion de la fibra de: a) -10 ps/nm*Km. b) 0 ps/nm*Km. c) 10 ps/nm*Km.

| | -10 ps/nm*Km | 0 ps/nm*Km | 10 ps/nm*Km |
|------------------|--------------|------------|-------------|
| Jitter(ns) | 0,0147 | 0.02248 | 0,0144 |
| BER | 2,00E-15 | 1,E-40 | 1,E-34 |
| Factor Q (dB) | 18,25350 | 28,1844 | 23,6064 |
| OSNR(dB) | 52 | 51,41 | 52,277 |
| Pot. Señal (dBm) | -0,09 | -0,14 | -0,052 |

Tabla 3.10 Resultados de la variación de la dispersión en enlace de 16 canales con 1 span de 80 km.

En la figura 3.28 y la tabla 3.10 se puede observar con mayor claridad que la SPM y su ruido no lineal inducido si tiene un efecto en la señal, por lo cual el control de la dispersión cromática adquiere mucha más relevancia.



b) Para NRZ-DPSK.

En la figura 3.29 y la tabla 3.11 se pueden ver los resultados de la simulación cuando se implemento un enlace de 16 canales DPSK con 1 span de 80Km y se obtuvieron los siguientes resultados:

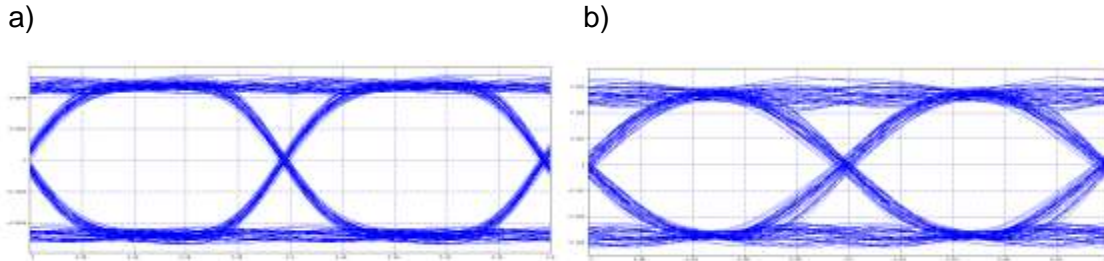


Figura 3.29 Sistema de 16 canales NRZ-DPSK de un span de 80 km con ganancia de amplificador EDFA de: a) 0dB y b) 20dB.

| | EDFA 0dB | EDFA 20dB |
|----------------|----------|-----------|
| Jitter(ns) | 0,021 | 0,01956 |
| BER | 1,00E-40 | 1,00E-33 |
| Factor Q (dB) | 28,6582 | 24.6275 |
| OSNR(dB) | 51,6240 | 51,706 |
| Pot señal(dBm) | -1,37 | -1,277 |

Tabla 3.11 Resultados de la variación de la ganancia del EDFA en un enlace de 16 canales con 1 span de 80 km.

Por otra parte, y al igual que se realizó para el formato de modulación NRZ-OOK, se verifica si el efecto de la dispersión cromática combinado con la SPM mediante el régimen de dispersión normal ($CD < 0$) y el régimen de dispersión anómalo ($CD > 0$), genera cambios en los parámetros de monitoreo óptico.

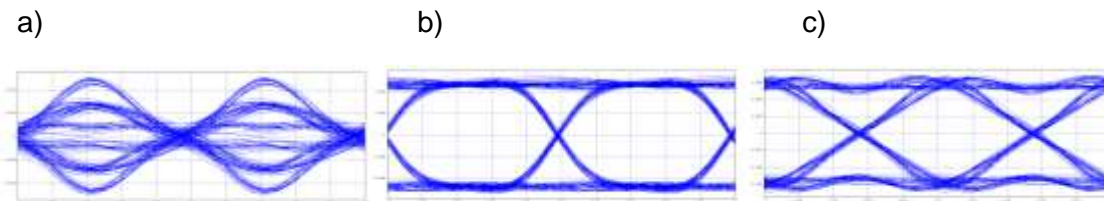


Figura 3.30 Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y un span de 80km, con dispersión de la fibra de: a) -10 ps/nm*Km. b) 0 ps/nm*Km. c) 10 ps/nm*Km.

En el caso particular del resultado de la figura 3.30 y la tabla 3.12, se pudo observar que el sistema NRZ-DPSK puede soportar un poco más el incremento de la Dispersión

Cromática y el incremento del **ruido no lineal de fase inducido por la SPM**, aunque queda claro que si lo afectan.

| | -10 ps/nm*Km | 0 ps/nm*Km | 10 ps/nm*Km |
|----------------|--------------|------------|-------------|
| Jitter(ns) | 0,012675 | 0,0208 | 0,01626 |
| BER | 0,00521 | 1E-40 | 1E-36 |
| Factor Q (dB) | 8,28 | 29,15 | 24,0020 |
| OSNR(dB) | 51,45 | 51,70 | 51,5825 |
| Pot señal(dBm) | -1,02 | -1,03 | -1,064 |

Tabla 3.12 resultados de la variación de la dispersión en enlace NRZ-DPSK de 16 canales con 1 span de 80 km.

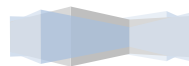


CAPÍTULO 4. SOLUCIONES PARA MITIGAR EL EFECTO DEL RUIDO EN REDES WDM USANDO DETECCIÓN COHERENTE CON RECEPTORES ÓPTICOS HETERODINOS

Después de obtener resultados de simulación en el capítulo anterior que muestran los efectos del ruido en redes WDM con detección coherente, es necesario hacer modificaciones pertinentes de un conjunto parámetros que lleven a establecer las características de redes WDM que permitan mitigar el ruido. Con el fin de darle agilidad al proyecto, todas las modificaciones se implementarán al mismo tiempo.

Al plantearse la necesidad de mitigar los efectos producidos por la atenuación, la Dispersión cromática y el ruido de fase inducido por efectos no lineales de la fibra, se realizaron las siguientes modificaciones en la red:

1. Ya que no se logró obtener que los parámetros de desempeño alcanzaran valores dentro de los establecidos en el capítulo 2 cuando se implementan 32 canales, se reduce el número de canales a 4, 8 y 16. La presencia de ruido de fase inducido por la XPM pone límites en la implementación de canales, razón por la cual se trabaja con un máximo de 16.
2. En un principio se definió la longitud del enlace en 500Km, y en el capítulo anterior se establecieron longitudes de span que llevaron a que se excedieran estos 500Km en un rango de 20 a 40Km adicionales. Esto llevó a que la señal tuviera una fuerte sensibilidad a la dispersión y la atenuación, y como es muy difícil lograr en la práctica una compensación del 100% de la dispersión, era necesario recortar las longitudes de los span, para que con el mismo número de amplificadores se tuviera una longitud de enlace más corta. De esta forma se busca un límite en la longitud del enlace sobre el cual haya un buen desempeño de la señal. Sin embargo, en el anexo se incluyen los resultados de simulación para el caso en que se añade un span a ésta nueva longitud del enlace.
3. En el capítulo anterior los enlaces tenían una compensación de la dispersión 70%, con el cuales no se obtuvieron resultados que cumplieran con los valores mínimos de desempeño, por lo cual se parte del supuesto de mejorar la compensación de la dispersión y se modifica la compensación de la dispersión a 80%. En este sentido se tiene en cuenta el caso ideal de la compensación del 100% para observar el efecto de los cambios de los demás parámetros, pero también se tiene en cuenta el caso en que se logre solo compensar el 80%, para observar en qué condiciones es posible lograr un desempeño aceptable bajo esta condición de dispersión.
4. En el capítulo anterior se utilizaron amplificadores EDFA de ganancia al 100%. Buscando obtener mejor desempeño del sistema combatiendo la atenuación y el ruido, se cambiaron por amplificadores de potencia a 3 dB, el cual contrarresta los ruidos inducidos por la modulación externa, y genera una adecuada ganancia, lo cual ayudara al sistema a mejorar su rendimiento. Además, su amplificación en potencia ayuda a contrarrestar los efectos de los ruidos inducidos por XPM y SPM.



5. Se modificará la potencia del Oscilador Local, para verificar si el aumento de este parámetro mejora el desempeño frente al ruido, como una forma de mitigar su efecto, dentro de un rango de valores pertinente.

Con estas modificaciones se espera un mejor rendimiento, en el que se busca contrarrestar la atenuación y la dispersión, como efectos lineales que más incidencia presentaron sobre el sistema. A continuación se demuestra que los cambios sugeridos presentan u ofrecen mejoras en el sistema.

4.1 Formato de modulación NRZ-OOK con Receptor Heterodino ASK Asíncrono

A pesar de las modificaciones realizadas a la red, la Dispersión cromática sigue siendo el factor que mayores efectos produce sobre el desempeño del sistema; sin embargo, se lograron obtener algunas configuraciones en las que el sistema presenta valores aceptables en sus parámetros de rendimiento. En la figura 4.1 se puede observar que el deterioro de la señal no es tan elevado como se vio en el capítulo anterior, aunque la diferencia entre la señal compensada en 80% y la de 100% es considerable.

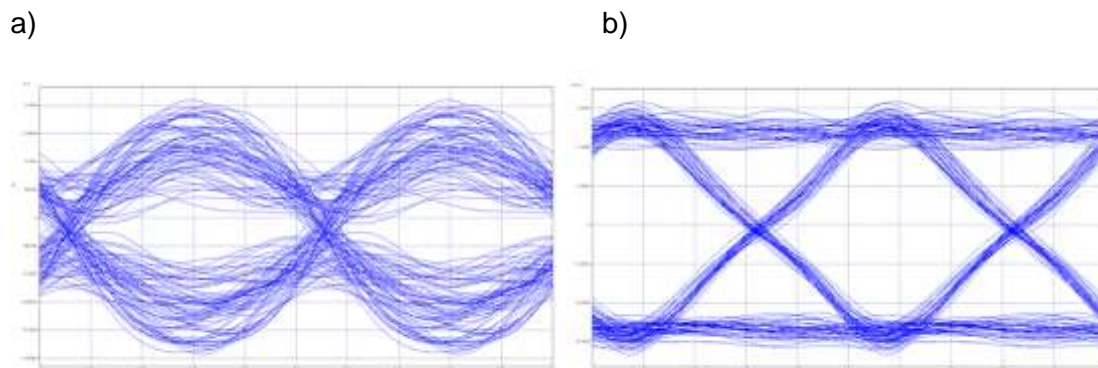


Figura 4.1 Sistema NRZ-OOK con 4 canales, 6 span de 60 Km y: a) Compensación del 80% de la CD. b) Compensación del 100% de la CD

La diferencia más importante de mejora del rendimiento está en que en el capítulo anterior no se logró una BER aceptable para ningún caso con compensación del 70%, mientras que con las modificaciones realizadas se logró una BER superior a 10^{-10} en varios casos donde la compensación es del 80%. Los casos son: 4 canales con 4 y 5 span, 8 canales en todos los casos, y 16 canales con 5 span (las figuras de los enlaces anteriormente mencionados se encuentran en el anexo).

En los siguientes ítems se mostrarán los resultados obtenidos bajo los cambios de los parámetros mencionados al inicio del capítulo.

4.1.1 Reducción de la longitud del enlace

En el siguiente grupo de simulaciones se mostrara las mejoras en el desempeño del enlace al reducir la longitud del enlace. Para este caso de modulación NRZ-OOK se construyeron y configuraron enlaces con una longitud no menor a 350 km, cuyos resultados veremos en las figuras 4.2, 4.3, 4.4 y sus respectivas tablas de resultados:

Como se puede ver en la figura 4.2 y la tabla 4.1, con un enlace de 4 canales con una compensación del 100% de la CD, se muestran las mejoras con respecto al ruido de amplificación:

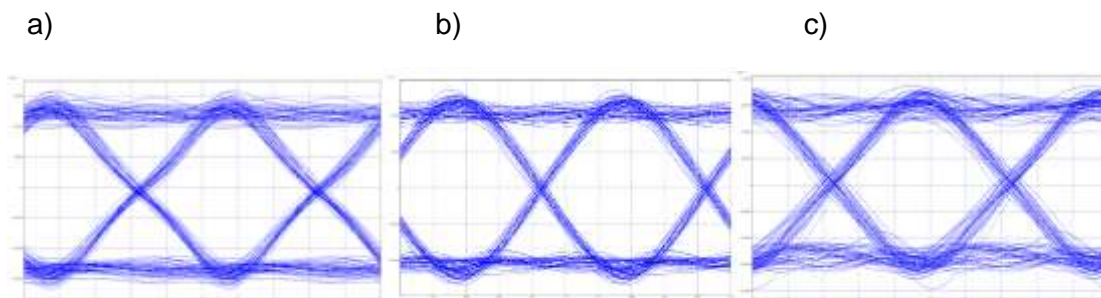


Figura 4.2 Sistema NRZ-OOK con 4 canales y: a) 6 span de 60km. b) 5 span de 70km. c) 4 span de 80Km.

| | 6 Span de 60 km | 5 Span de 70 km | 4 Span de 80 km |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| OSNR antes del detector | 52,973400 | 52,82330 | 52,632100 |
| Potencia Rx antes del detector | -21,375200 | -24,32380 | -27,234400 |
| OSNR en el detector | 51,777000 | 51,72740 | 51,728100 |
| Potencia Rx en el detector | -0,433300 | -0,04253 | -0,410000 |
| Jitter (ns) | 0,015000 | 0,016400 | 0,017293 |
| BER | 1,2237 E-39 | 1 E-40 | 1,4 E-27 |
| Factor Q dB | 22,363200 | 23,670300 | 20,791300 |

Tabla 4.1 Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-OOK con 4 canales, y compensación del 100%.

Los resultados muestran que el mejor desempeño se logra con una longitud de span de 70Km. Cuando se reduce la distancia el desempeño baja un poco, debido a la influencia que genera el ruido de amplificación, y si se aumenta la longitud del span por encima de 70 también disminuye la BER, debido al **ruido de fase que induce la SPM** que aumenta con la distancia.

Los resultados de simulación para un enlace con 8 canales y compensación del 100% de la dispersión, se pueden observar en la figura 4.3 y la tabla 4.2:

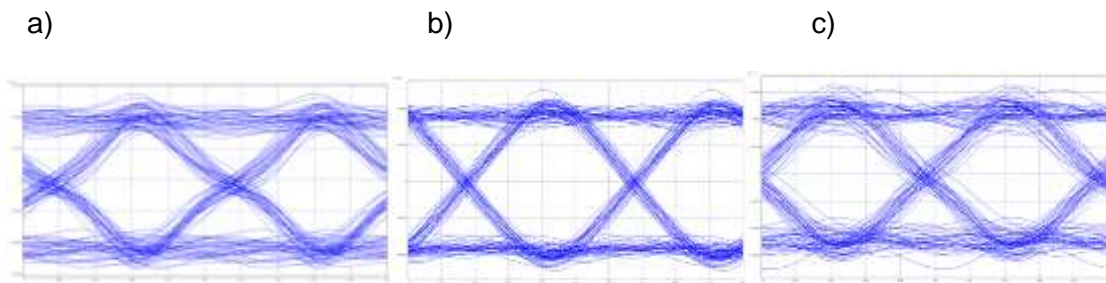


Figura 4.3 Sistema NRZ-OOO con 8 canales y: a) 6 span de 60km. b) 5 span de 70km. c) 4 span de 80Km

| | 6 Span de 60 km | 5 Span de 70 km | 4 Span de 80 km |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| OSNR antes del detector | 52,495000 | 53,5427 | 52,910800 |
| Potencia antes del Rx | -24,310200 | -27,1735 | -30,266400 |
| OSNR en el detector | 51,721560 | 51,7104 | 51,693500 |
| Potencia Rx en el detector | 1,550400 | 1,5656 | 1,559100 |
| Jitter (ns) | 0,016500 | 0,0182 | 0,014790 |
| BER | 7,398 E-16 | 4,9371 E-35 | 1,8844 E-14 |
| Factor Q dB | 18,096700 | 21,803500 | 17,596300 |

Tabla 4.2 Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-OOO con 8 canales, y compensación del 100%.

Al igual que lo resultados de la simulación de un enlace de NRZ-OOO con 4 y 8 canales, muestran que el mejor desempeño se logra con una longitud de span de 70 Km y una disminución en el desempeño de los enlaces de 60 km y 80 km por el ruido de amplificador y al ruido de fase respectivamente.

Los resultados de la simulación de un enlace NRZ-OOO con 16 canales y compensación del 100% de la dispersión, se pueden observar en la figura 4.3 y la tabla 4.2:

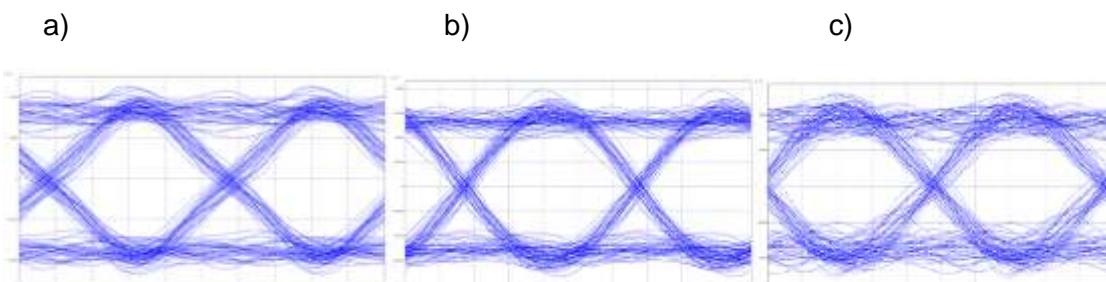


Figura 4.4 Sistema NRZ-OOO con 16 canales y: a) 6 span de 60 km. b) 5 span de 70 km. c) 4 span de 80 Km

| | 6 Span de 60 km | 5 Span de 70 km | 4 span de 80 km |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| OSNR antes del detector | 52,311400 | 53,53545 | 52,57880 |
| Potencia antes del Rx | -27,298100 | -30,11677 | -33,17740 |
| OSNR en el detector | 51,723200 | 51,71211 | 51,72475 |
| Potencia Rx en el detector | 1,559500 | 1,57050 | 1,57545 |
| Jitter (ns) | 0,016713 | 0,018050 | 0,018570 |
| BER | 2,4139 E-22 | 1,46909 E-24 | 8,7145 E-13 |
| Factor Q dB | 19,803290 | 20,165200 | 17,02830 |

Tabla 4.3 resultados de la variación de Span en enlace NRZ-OOK con 16 canales, y compensación del 100%.

Al ver los resultados de la figura 4.4 y la tabla 4.3, y en general con los resultados anteriores se puede notar que si se amplía la longitud del span utilizando cada vez menos amplificadores sin modificar la longitud del enlace, se deteriora la señal paulatinamente.

En esta ocasión como se puede ver más clara mente en la figura 4.5, se logra un óptimo desempeño en todos los casos, aun cuando se implementan 16 canales con 4 span, que es el caso más crítico, donde se alcanza una BER del orden de 10^{-13} .

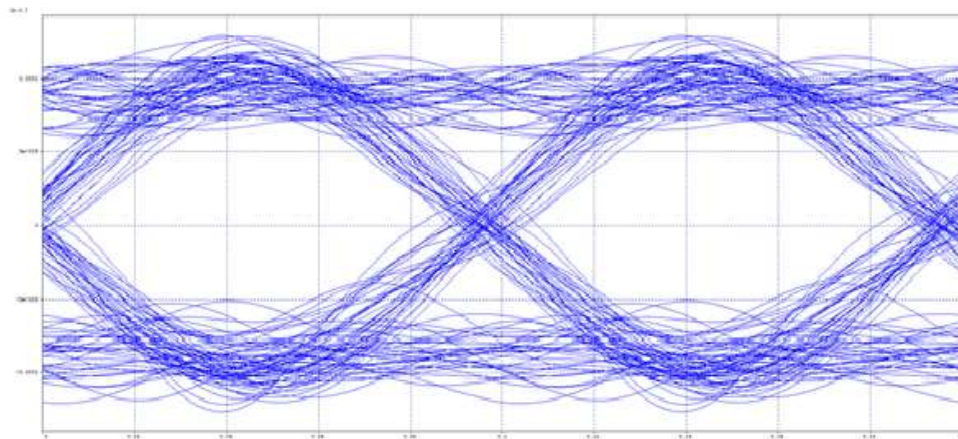
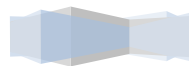


Figura 4.5 Sistema NRZ-OOK de 16 canales con 4 span de 80Km

Es común a todos los casos que el sistema presenta el mejor desempeño cuando se utilizan span de 70 Km (5 en total), lo que muestra que debe buscarse siempre este valor de longitud del span, que hace un buen equilibrio entre la amplificación necesaria para no permitir que la atenuación afecte la señal, y el menor número de amplificadores **cuyo ruido no disminuya su desempeño**.



4.1.2 Supresión del enlace de 32 canales e implementación de enlaces de máximo 16 canales

En el siguiente grupo de simulaciones se mostrara las mejoras en el desempeño del enlace en el aumento el número de canales bajo las nuevas condiciones. Para este caso de modulación NRZ-OOK se suprimió el enlace con 32 canales y construyeron enlaces de 4, 8 y 16 canales, cuyos resultados veremos en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y sus respectivas tablas de resultados:

En la figura 4.6 se pueden ver los efectos que tiene el aumento de canales en la señal.

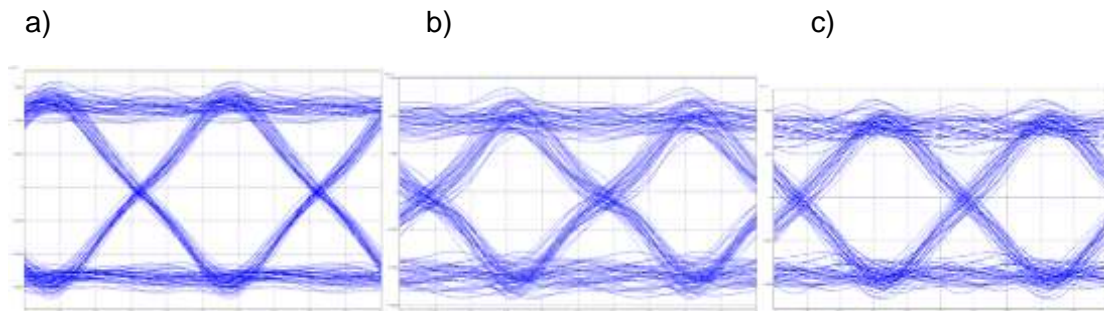


Figura 4.6 Sistema NRZ-OOK de 6 span de 60 km y: a) 4 canales. b) 8 canales. c) 16 canales.

En la figura 4.6 se muestra un cuadro comparativo de diferentes número de canales NRZ-OOK implementados con 6 span, se puede ver que el deterioro de la señal aumenta cuando hay un incremento de los canales, lo cual muestra que la XPM sigue induciendo ruido de fase no lineal, pero en niveles ahora más controlados. Aquí salió un resultado inesperado, en el sentido de que el sistema tuvo mejor desempeño con 16 canales que con 8, aunque la diferencia no es muy grande. Esto lleva a concluir que la dispersión baja lo suficiente como para disminuir el efecto Walk-Off, y con esto aumentar la XPM, lo cual se contrarresta cuando se aumentan los canales a 16.

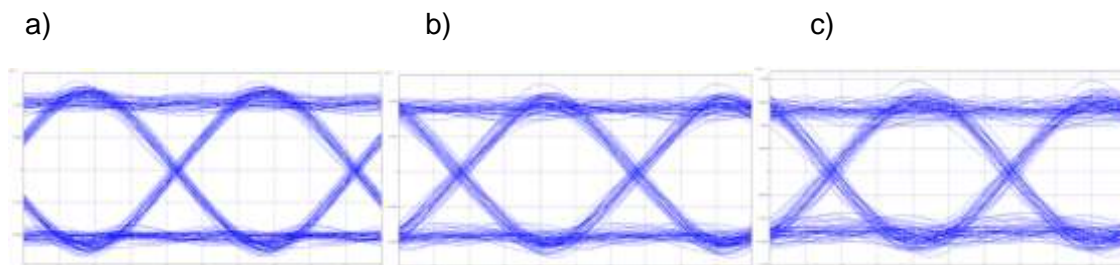


Figura 4.7 Sistema NRZ-OOK de 5 span de 70 km y: a) 4 canales. b) 8 canales. c) 16 canales.

En la figura 4.7 se varían los canales a 5 span, a diferencia del caso anterior, la señal se deteriora con el aumento de los canales, donde el peor desempeño se obtiene con 16 canales, mostrando un comportamiento normal de la XPM como generadora de ruido de fase no lineal.

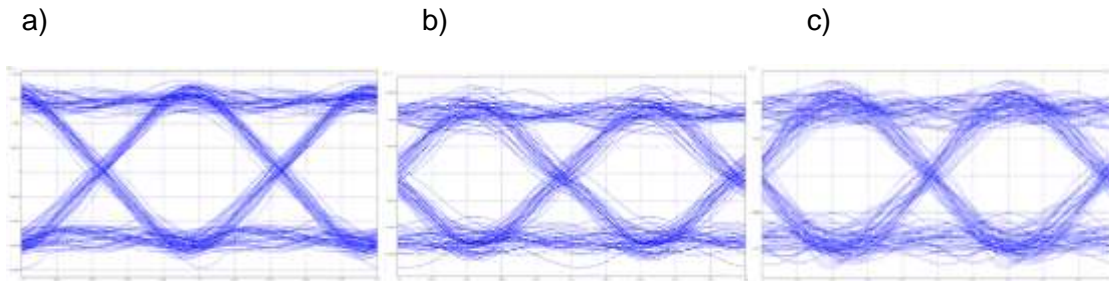


Figura 4.8 Sistema NRZ-OOK de 4 span de 80 km y: a) 4 canales. b) 8 canales. c) 16 canales.

En la figura 4.8 se varían los canales a 4 span. Comparado con los anteriores resultados se obtiene el peor desempeño del sistema, pero con una BER aún confiable en el orden de 10^{-13} para el peor de los casos, con 16 canales. Se nota mucho en los diagramas la presencia de ruido de fase, aun cuando se implementan solo 4 canales, lo cual muestra la sensibilidad que tienen los sistemas WDM con detección coherente al ruido de fase.

4.2 Formato de modulación NRZ-DPSK con Receptor Heterodino DPSK Asíncrono.

En el sistema NRZ-DPSK la dispersión cromática sigue siendo el factor más importante en la generación de ruido sobre la señal, como se puede observar en la figura 4.9, donde los unos y ceros se encuentran totalmente desfasados y no se puede obtener una figura de ojo consistente cuando se compensa el 80% de la Dispersión Cromática.

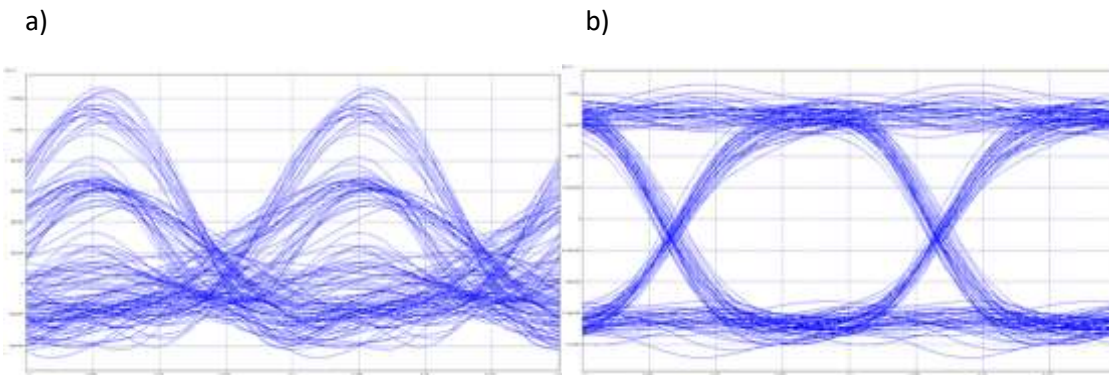


Figura 4.9 Sistema NRZ-DPSK con 16 canales, 5 span y: a) Compensación del 80% de la CD. b) Compensación del 100% de la CD

A pesar de esto se obtuvieron, bajo ciertas condiciones, valores aceptables de la BER compensando el 80% de la Dispersión. Solamente se logró para dos casos: 4 canales con 6 span y 8 canales con 6 span. Esto demostró que los sistemas con modulación de fase son mucho más sensibles a la dispersión cromática que los sistemas con modulación de amplitud, al tiempo que requieren más amplificadores y una longitud del span más corta para contrarrestar los ruidos inducidos por la dispersión.

En los siguientes ítems se mostraran los resultados obtenidos bajo los cambios de los parámetros mencionados al inicio del capítulo.

4.2.1 Reducción de la longitud del enlace

En el siguiente grupo de simulaciones se mostrara las mejoras en el desempeño del enlace al reducir la longitud del enlace. Para este caso de modulación NRZ-DPSK se construyeron y configuraron enlaces con una longitud no menor a 350 km, cuyos resultados veremos en las figuras 4.10, 4.11, 4.12 y sus respectivas tablas de resultados:

Los resultados obtenidos cuando se implementa un enlace de 4 canales NRZ-DPSK, con compensación del 100% de la dispersión cromática y variación del número de span, se pueden ver a continuación en la figura 4.10 Y tabla 4.4:

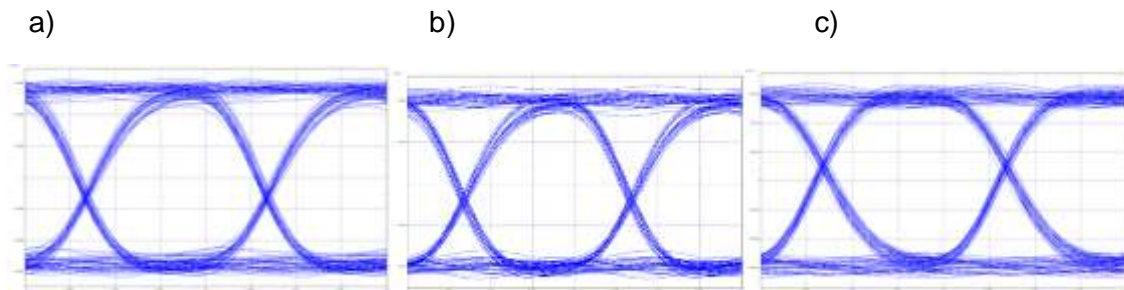


Figura 4.10 Sistema NRZ-DPSK con 4 canales y: a) 6 span de 60 km. b) 5 span de 70km. c) 4 span de 80Km.

A comparación de los resultados obtenidos cuando se varió el número de span con modulación NRZ-OOK con 4 canales, se puede ver que con modulación NRZ-DPSK los cambios son mínimos, pero aún se puede notar un mejor factor Q en enlace de 5 span de 70 km.

| | 6 Span de 60 km | 5 Span de 70 km | 4 Span de 80 km |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| OSNR antes del detector | 52,560800 | 52,31255 | 52,108090 |
| Potencia antes del detector | -21,653300 | -24,66280 | -27,609800 |
| OSNR en el detector | 54,104560 | 54,10922 | 54,105700 |
| Potencia Rx en el detector | 1,333000 | 1,335300 | 1,355638 |
| Jitter (ns) | 0,021100 | 0,022140 | 0,020754 |
| BER | 1 E-40 | 1 E-40 | 1 E-40 |
| Factor Q dB | 24,042300 | 25,083900 | 24,011490 |

Tabla 4.4 Resultados de la variación de span en enlace NRZ-DPSK con 4 canales, y compensación del 100%.

Los resultados obtenidos cuando se implementa un enlace de 8 canales NRZ-DPSK, con compensación del 100% de la dispersión cromática y variación del número de span, se pueden ver a continuación en la figura 4.11 Y tabla 4.5:

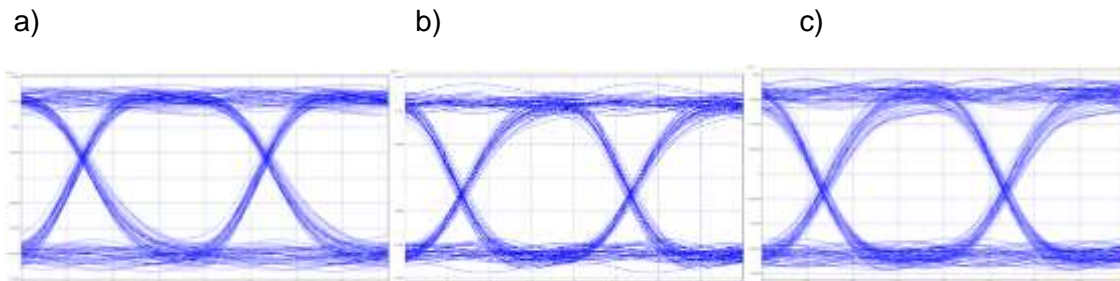


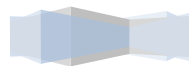
Figura 4.11 Sistema NRZ-DPSK con 8 canales y: a) 6 span de 60km. b) 5 span de 70km. c) 4 span de 80Km.

| | 6 Span de 60 km | 5 Span de 70 km | 4 Span de 80 km |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| OSNR antes del detector | 52,547900 | 52,31780 | 52,211700 |
| Potencia antes del detector | -24,639500 | -27,61180 | -30,646700 |
| OSNR en el detector | 54,092800 | 54,11350 | 54,115360 |
| Potencia Rx en el detector | -0,392490 | -0,439900 | -0,435060 |
| jitter (ns) | 0,024250 | 0,021900 | 0,020600 |
| BER | 1 E-40 | 1 E-40 | 2,615 E-31 |
| Factor Q dB | 22,703900 | 22,999000 | 21,273400 |

Tabla 4.5 Resultados de la variación de Span en enlace NRZ-DPSK con 8 canales, y compensación del 100%.

Cuando se varía el número de span en un enlace de 8 canales NRZ-DPSK, se puede ver que solo a los 4 span se degrada considerablemente la BER, además que se puede notar aún un mejor factor Q obtenido con un enlace de 5 span de 70 km.

Los resultados obtenidos cuando se implementa un enlace de 16 canales NRZ-DPSK, con compensación del 100% de la dispersión cromática y variación del número de span, se pueden ver a continuación en la figura 4.12 Y tabla 4.6:



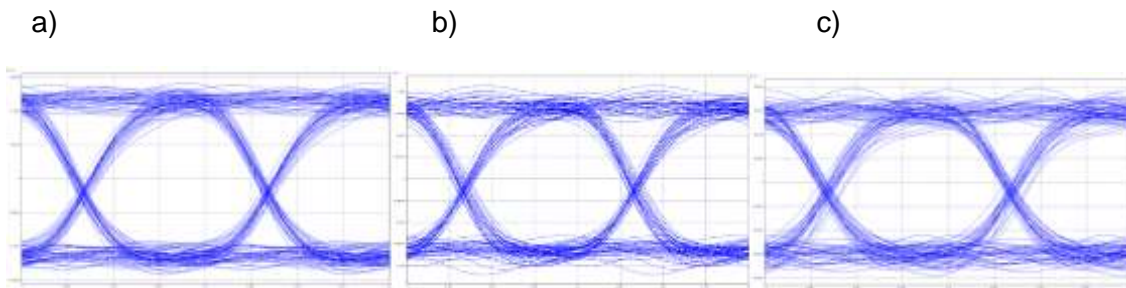


Figura 4.12 Sistema NRZ-DPSK con 16 canales y: a) 6 span de 60km. b) 5 span de 70km. c) 4 span de 80Km.

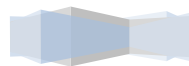
| | 6 Span de 60 km | 4 Span de 80 km | 3 span de 100 km |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| OSNR antes del detector | 52,423800 | 52,23160 | 52,041210 |
| Potencia antes del detector | -27,687500 | -30,63770 | -33,601800 |
| OSNR en el detector | 54,114400 | 54,11220 | 54,111700 |
| Potencia Rx en el detector | -0,434010 | -0,431800 | -0,430900 |
| jitter (ns) | 0,020990 | 0,021830 | 0,021760 |
| BER | 1,5762 E-30 | 2,92588 E-32 | 4,4057 E-21 |
| Factor Q dB | 21,381300 | 21,705800 | 19,531700 |

Tabla 4.6 Resultados de la variación de span en enlace NRZ-DPSK con 16 canales, y compensación del 100%.

Solo en enlace de 16 canales NRZ-DPSK, se puede observar un cambio significativo en la BER, aunque sigue dentro de los parámetros de calidad establecidos en la norma.

Después de compensada la dispersión cromática, se puede observar que el desempeño del sistema NRZ-DPSK es mucho mejor que el del sistema NRZ-OOK, ya que la BER más alta alcanzó el orden de 10^{-21} , lo cual está muy lejos del máximo estipulado en el capítulo 2 para este parámetro. En éste sistema en fase también se obtuvo los mejores valores para los parámetros de desempeño cuando se usaron span de 70 Km. La OSNR aumenta después de pasar por el detector, lo cual muestra que el sistema NRZ-DPSK es menos sensible a ruidos en el receptor, y la amplificación generada por el receptor coherente compensa la potencia de ruido de la señal recibida.

Sigue existiendo ruido de fase en varias señales producto del aumento de la longitud del span, sin embargo no afecto lo suficiente como para llevar los parámetros de desempeño a no cumplir con los valores de referencia.



4.2.2 Supresión del enlace de 32 canales e implementación de enlaces de máximo 16 canales

En el siguiente grupo de simulaciones se mostrara las mejoras en el desempeño del enlace en el aumento el número de canales bajo las nuevas condiciones. Para este caso de modulación NRZ-DPSK se suprimió el enlace con 32 canales y construyeron enlaces de 4, 8 y 16 canales, cuyos resultados veremos en las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y sus respectivas tablas de resultados:

En la figura 4.13 se pueden ver los efectos que tiene el aumento de canales en la señal.

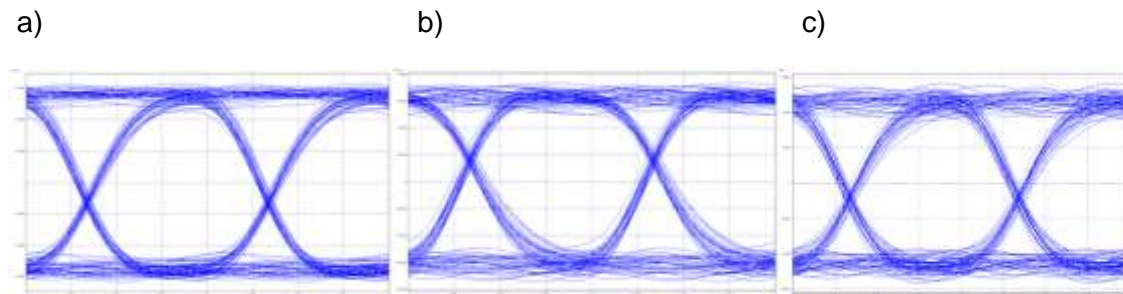


Figura 4.13 Sistema NRZ-DPSK de 6 span de 60km y: a) 4 canales. b) 8 canales. c) 16 canales.

En la figura 4.13 se muestra un cuadro comparativo de diferentes número de canales NRZ-DPSK implementados con 6 span, en esta figura se puede ver un leve deterioro de la señal aumenta cuando hay un incremento de los canales, lo cual muestra que la XPM sigue induciendo ruido de fase no lineal pero no con tanta intensidad como se pudo ver en el formato NRZ-OOK.

Para un enlace de 5 span se obtuvo lo siguiente:

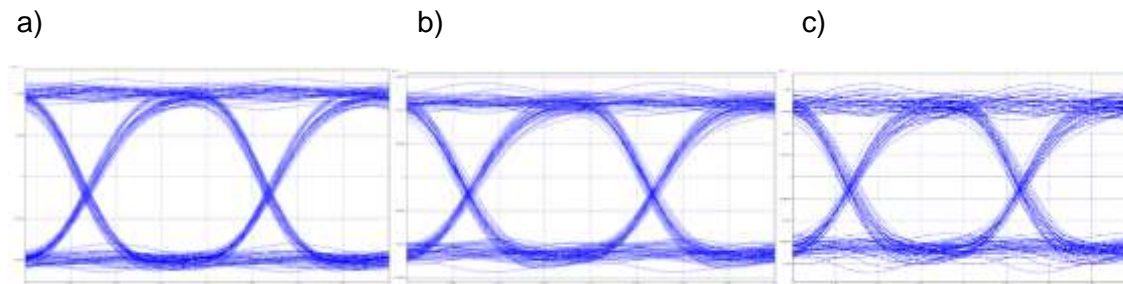


Figura 4.14 Sistema NRZ-DPSK de 5 span de 70km y: a) 4 canales. b) 8 canales. c) 16 canales.

En la figura 4.14 se varían los canales a 5 span, A Diferencia del caso anterior, la señal se va deteriorando un poco con el aumento de canales, donde el peor desempeño se obtiene con 16 canales, mostrando un comportamiento normal de la XPM como generadora de ruido de fase no lineal.

Por último, cuando se utilizan 4 span se obtuvo:

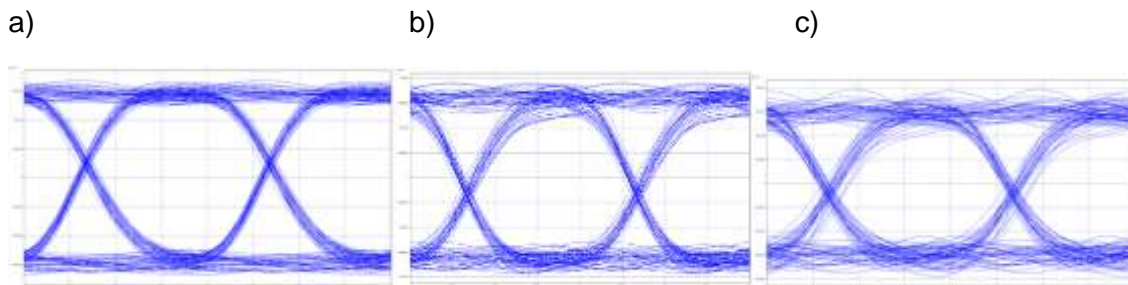


Figura 4.15 Sistema NRZ-DPSK de 4 span de 80km y: a) 4 canales. b) 8 canales. c) 16 canales.

En la figura 4.8 se puede ver la variación de canales a 4 span. Comparado con los anteriores resultados, se da un deterioro de la señal el cual es más marcado cuando se tienen 16 canales, pero con una BER aún confiable. Nuevamente se ve como la XPM induce ruido de fase no lineal en la señal, que aunque no es mucho, hace que se vean los desfases en el diagrama del ojo. A pesar de esto, la definición de un límite para el número de canales y para la longitud del span permitió que se logaran desempeños muy buenos de la señal de llegada.

Conclusiones:

De acuerdo con el análisis de resultados, se pueden sacar las siguientes conclusiones sobre el efecto del ruido:

- La OSNR comparada antes del receptor y después del mismo disminuye, a pesar de que la potencia aumenta después de que se combina la señal entrante con la del Oscilador Local, lo cual muestra que en el sistema NRZ-OOK la amplificación de la señal que genera la detección coherente **no compensa la potencia de los ruidos presentes en el detector**.
- Para el sistema NRZ-DPSK se ve el fenómeno contrario, en el cual la OSNR aumenta después de pasar por el detector, lo cual muestra que **es menos sensible a los ruidos en recepción**, y la amplificación generada por la detección coherente **compensa la potencia de ruido recibida**.
- La dispersión cromática debe ser compensada la mayor cantidad posible, cercana al 100%. Para esto existen trabajos que han profundizado en el tema, donde sobresalen

soluciones que utilizan Procesamiento Digital de Señales para tal fin, como se mencionó en el capítulo 1, sección 1.4.4.

- La XPM es un factor clave de desestabilización del sistema, después de la dispersión cromática. Pero con un número moderado de canales implementados, con límite 16 a un espaciamiento de 100GHz en la velocidad de 10Gbps, se puede obtener una BER dentro del rango definido en el capítulo 2.
- Los sistemas NRZ-DPSK superan con una amplia diferencia en desempeño a los sistemas NRZ-OOK cuando se compensa el 100% de la dispersión cromática, pero son muy sensibles a este efecto lineal y a los efectos no lineales que dependen también de la dispersión.
- La utilización de amplificadores de potencia en vez de amplificadores de ganancia, fue uno de los factores más importantes en el mejoramiento del comportamiento de la señal, ya que permitió combatir efectivamente los efectos de la atenuación y el mejoramiento de la relación señal a ruido.

4.3 Análisis del efecto de la SPM

Es importante hacer el ejercicio comparativo del efecto que tiene **el ruido de fase inducido por la SPM** para las nuevas condiciones de red, de forma tal que se puedan establecer unos límites en algunos parámetros para contrarrestar éste ruido. En específico es necesario establecer un máximo de potencia de amplificación, ya que esta parte de la red fue cambiada, con el cual se encuentre el valor que aproximadamente presente mejor desempeño frente a este ruido. La potencia de amplificación es uno de los parámetros que más influye en la generación de ruido de fase inducido por SPM, como se pudo observar en el capítulo 1 de este trabajo. Tanto para NRZ-OOK como para NRZ-DPSK se tomó un enlace con un solo span de 70Km, con amplificador EDFA de potencia que se varía entre 0, 9 y 21dBm, con tasa de transmisión de 10Gbps y 4 canales.

4.3.1 SPM en NRZ-OOK.

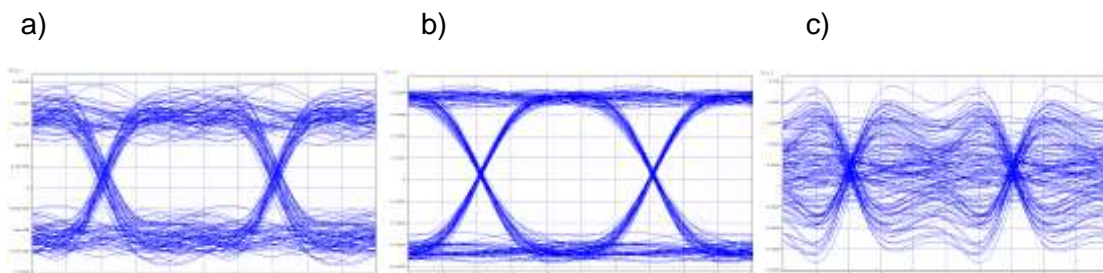


Figura 4.16 Sistema de 4 canales NRZ-OOK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de: a) 0dBm, b) 9dBm y c) 21dBm.

| | 0 dBm | 9 dBm | 21 dBm |
|-----------------------------|------------|---------|---------|
| OSNR antes del detector | 53,0873 | 53,0729 | 53,0986 |
| Potencia antes del detector | -26,781 | -17,789 | -5,871 |
| OSNR en el detector | 51,704 | 51,8529 | 51,8544 |
| Potencia Rx en el detector | -0,3993 | -0,3127 | -0,4454 |
| Ritter (ns) | 0,021449 | 0,02144 | 0,027 |
| BER | 4,0399 E-9 | 1 E-40 | 0,0227 |
| Factor Q dB | 15,358 | 25,236 | 6,0206 |

Tabla 4.8 Resultados de la variación de la potencia del amplificador EDFA en un enlace NRZ-OOK de 70 km.

Estos resultados de simulación como se muestra en la figura 4.16 y tabla 4.8, demuestran que el aumento óptimo de la potencia de los amplificadores genera un mejor desempeño de la señal porque ésta tiene el suficiente nivel de potencia como para contrarrestar los efectos de la atenuación y el ruido, pero si se aumenta demasiado esta potencia la SPM induce demasiado ruido en la señal, el cual se incrementa considerablemente con el aumento del número de span como se detalló en el capítulo 1 a través de la ecuación 1.14. Si se miran ciegamente los resultados aquí expuestos, se podría afirmar que el mejor valor de potencia para los amplificadores es 9dBm, pero no se puede afirmar esto sin tener en cuenta que en este caso sólo hay un span con un único amplificador, y que con el aumento del número de span para alcanzar la longitud total del enlace se incrementaría también el ruido inducido por SPM y aumentaría la BER. Es así como es preferible trabajar con 9dBm como un valor de referencia, y dejar como trabajo futuro la exploración del valor de la potencia exacta para un determinado número de span y condiciones de red. Mientras tanto, trabajar con un valor un poco más bajo pero no tan alejado de la referencia, es una buena forma de robustecer el sistema frente a este ruido, como se hizo en secciones anteriores al fijar la potencia de amplificación en 3 dBm.

Por otro lado se nota la alta sensibilidad que tiene el sistema NRZ-OOK al ruido de fase inducido por la SPM, ya que la señal se degrada demasiado cuando se aumenta la potencia del amplificador a 21 dBm.

4.3.2 SPM en NRZ-DPSK.

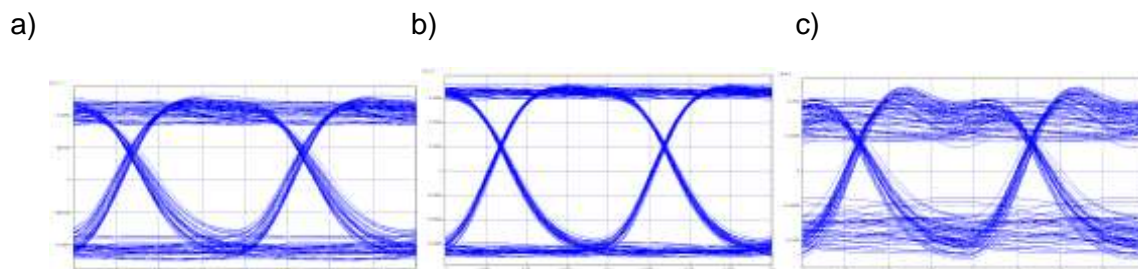


Figura 4.17 Sistema de 4 canales NRZ-DPSK con un span de 70km con potencia de amplificador EDFA de: a) 0dBm, b) 9dBm y c) 21dBm.

| | 0 dBm | 9 dBm | 21 dBm |
|-----------------------------|------------|----------|-----------|
| OSNR antes del detector | 52,04052 | 52,3936 | 52,333 |
| Potencia antes del detector | -26,9579 | -17,9861 | -6,2138 |
| OSNR en el detector | 54,09979 | 54,0657 | 53,9394 |
| Potencia Rx en el detector | -0,474833 | -0,3329 | -0,0013 |
| jitter (ns) | 0,0218 | 0,0187 | 0,0234099 |
| BER | 2,723 E-21 | 1 E-40 | 1,495 E-7 |
| Factor Q dB | 19,683 | 27,2193 | 14,2986 |

Tabla 4.9 Resultados de la variación de la potencia del amplificador EDFA para un enlace NRZ-DPSK de 70 km.

Sobre los resultados que se pueden ver en la figura 4.16 y tabla 4.8, se concluye lo mismo que para el caso en NRZ-OOK sobre el valor de referencia de 9 dBm para la potencia de los amplificadores, lo cual permite trabajar con un rango cercano a este valor cuando se incrementa el número de span.

Como particularidad se puede observar que el sistema NRZ-DPSK es menos sensible al ruido de fase inducido por la SPM, ya que el aumento de la potencia a 21 dBm deteriora la señal a niveles inaceptables, pero en ningún caso tan bajo como en el sistema NRZ-OOK. Esto lleva a concluir que puede ser preferible el uso de este formato de modulación si se quiere mitigar el efecto del ruido inducido por la SPM.

Es necesario aclarar que en esta sección no se tuvo en cuenta la variación de la Dispersión Cromática, ya que en el capítulo 3 y en [13] se demostró que el aumento de la dispersión incrementa el ruido de fase inducido por SPM, así que la mejor solución para mitigar este ruido es compensar la dispersión cromática al máximo, sin que se pudiese determinar un “mejor valor” para dicha compensación, como se hizo con la potencia de los amplificadores.

Lo que muestran los resultados del efecto del ruido inducido por la SPM, relacionando éstos con resultados de secciones anteriores, es que los sistemas NRZ-OOK son más sensibles a este ruido cuando hay modificaciones en la potencia de los amplificadores, lo cual es obvio por ser sistemas que modulan en amplitud. Pero cuando se modifica la dispersión cromática, se puede observar que los sistemas NRZ-DPSK son más sensibles al ruido de fase, como se observó en la figura 4.9.

4.4 Efecto de la variación de la potencia del Oscilador Local

En el capítulo 1 se detalló desde el punto de vista teórico que la detección coherente, al utilizar un Oscilador local en el receptor incrementa la relación señal a ruido OSNR, y por tanto aumenta la potencia de la señal recibida para hacerla más resistente a los efectos



de varios ruidos. En el capítulo 3 se pudo observar como la señal mejora su espectro de potencia y su OSNR (principalmente en sistemas DPSK) después de pasar por el detector con el Oscilador Local.

En esta sección se busca verificar si el aumento de la potencia del OL puede ayudar a mitigar los ruidos inducidos por los efectos no lineales y por la Dispersión Cromática, para lo cual se tomaron las mismas condiciones de la sección anterior, y se fijó la potencia de los amplificadores en 3 dBm. De esta forma en la tabla están plasmados los resultados que se obtuvieron para el **sistema ASK** se pueden ver en la tabla 4.10:

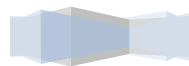
Los datos muestran que el aumento de la potencia del OL disminuye la BER y aumenta la OSNR, dejando claro que para este tipo de modulación es importante aumentar este parámetro lo que más se pueda. Esto es poco sorprendente, ya que en un sistema que modula en fase es importante recibir el factor amplificador del OL en el receptor.

| | Potencia Oscilador Local | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| | -6 dB | -3dB | 0 dB | 3dB | 6 dB | 9 dB |
| OSNR en el detector (dB) | 51,639 | 51,6541 | 51,66816 | 51,6793 | 51,6879 | 51,6943 |
| Pot. en el detector(dBm) | -9,2683 | -6,3312 | -3,3682 | -0,39 | 2,59 | 5,5868 |
| jitter (ns) | 0,023 | 0,02284 | 0,0218 | 0,0211 | 0,0205 | 0,0202 |
| BER | 5,75 E-6 | 2,777 E-7 | 2,02 E-13 | 1,17 E-17 | 5,2066 E-22 | 2,7822 E-25 |
| Factor Q (dB) | 13,017 | 15,338 | 17,2596 | 18,677 | 19,629105 | 20,2888 |

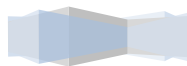
Tabla 4.10 Resultados de la variación de la potencia del oscilador local para un enlace NRZ-OOK de 70 km.

| | Potencia Oscilador Local | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|----------|------------|---------|-------------|---------|
| | -6 dB | -3dB | 0 dB | 3dB | 6 dB | 9dB |
| OSNR en el detector (dB) | 54,0575 | 54,0704 | 54,1308 | 54,0876 | 54,1067 | 54,1041 |
| Pot. en el detector (dBm) | -9,1644 | -6,2693 | -3,3107 | -0,3517 | 2,626 | 5,6097 |
| jitter (ns) | 0,0215 | 0,0218 | 0,0221 | 0,0236 | 0,02363 | 0,02401 |
| BER | 1,736 E-29 | 2,5 E-29 | 2,013 E-10 | 1 E-40 | 3,1943 E-26 | 1 E-40 |
| Factor Q dB | 21,198 | 21,1601 | 16,099 | 27,3512 | 20,6369 | 23,45 |

Tabla 4.11 Resultados de la variación de la potencia del oscilador local para un enlace NRZ-DPSK de 70 km.



Por otro lado, para el **sistema NRZ-DPSK** se obtuvieron los siguientes resultados que se encuentran en la tabla 4.11. Para el caso de los sistemas NRZ-DPSK el aumento de la potencia del Oscilador Local no genera el decrecimiento progresivo de la BER, si no que obtiene valores aleatorios. Se pueden tomar como valores de referencia 3 y 9 dBm, principalmente 3 debido a que presenta un mayor factor Q. En este caso, a diferencia de los sistemas NRZ-OOK, se deben tener en cuenta estos valores de referencia, ya que alejarse de estos puede traer desempeños regulares de la señal frente al ruido.



CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

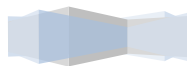
Después de realizar el análisis del efecto del ruido en sistemas WDM que utilizan detección coherente, de evaluar mediante la simulación dicho efecto, y de proponer y verificar posibles soluciones para mitigar el ruido que afectan estos sistemas WDM, se procede a plantear las conclusiones generales de este trabajo de investigación como síntesis de los aportes en conocimiento que quedan a la posteridad, de acuerdo con cada uno de los objetivos propuestos.

5.1 Conclusiones generales

- Sobre el efecto del ruido en recepción, para redes WDM cuando se utilizan receptores ópticos coherentes heterodinos, de acuerdo con las conclusiones específicas de la sección anterior, este trabajo muestra que cuando actúan varios ruidos al mismo tiempo existe un dominio de ciertos tipos de ruido y efectos de la fibra, sobre otros que en la teoría estudiada parecían tener mucha importancia. Se puede concluir que dominan el Retardo de Velocidad de Grupo inducido por la dispersión cromática y los ruidos de fase no lineal inducidos por la SPM y la XPM. Los demás ruidos como el ruido de amplificación, el ruido de fase del láser, y los ruidos ya descartados en la sección 1.4, son irrelevantes para los sistemas de detección coherentes con receptores heterodinos balanceados. Además de esto, se demuestra la relación entre la presencia de la dispersión cromática y la presencia de ruido inducido por efectos no lineales, haciendo evidente que para trabajar en la mitigación de estos ruidos hay que buscar un balance de la presencia de estos efectos.
- Este trabajo además deja unas características de red que pueden ser tomadas como referencia para mitigar el ruido en recepción para redes WDM con detección coherente, principalmente si hay cambios en algunas de las características de red expuestas en este trabajo.

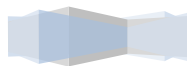
5.2 Conclusiones específicas

- El análisis del efecto del ruido en recepción en redes WDM con detección coherente permitió dar unas luces de posibles relaciones entre la dispersión cromática y la presencia de ruido de fase inducido por efectos no lineales de la fibra, así como posibles condiciones en las que unos ruidos dominan sobre otros: el ruido de amplificación domina sobre cualquier ruido producido por los fotodetectores o cualquier otro elemento eléctrico en recepción. Con base en esto se realizó un diseño de red con parámetros que variaban de forma tal que permitieran evaluar hasta que punto se daban éstas relaciones.
- Con la evaluación del efecto del ruido en recepción sobre redes WDM con detección coherente, realizada en el capítulo 3, se logró observar cómo el cambio de valores de algunos parámetros influían en el desempeño de la red, llevando a que se pudiera identificar cuáles eran los ruidos más relevantes sobre la señal bajo los diferentes



escenarios de simulación. Es así como se pudo identificar que la dispersión cromática, al inducir el Retardo de Velocidad de Grupo (Velocity Group Delay VGD), se convierte en el factor principal de deterioro del sistema, afectando profundamente la BER y los demás parámetros de desempeño definidos, y mostrando que los sistemas con detección coherente a 10Gbps son altamente sensibles a este efecto lineal. Si no se logra suficiente compensación de la dispersión cromática (cerca al 100%) el efecto de cualquier otro ruido es absolutamente irrelevante sobre la señal.

- Como se pudo observar en el capítulo 3 cuando se aumenta la longitud del span a 100Kms para utilizar menos amplificadores en el enlace, la atenuación es lo suficientemente fuerte como para deteriorar totalmente la señal, razón por la cual el desempeño bajo ésta condición fue muy deficiente en todos los casos. Por otro lado, la utilización de más amplificadores para tener longitudes del span más pequeña, mejoran la señal considerablemente, haciendo que **el ruido de amplificación** en recepción sea **irrelevante** frente a la necesidad de compensar las pérdidas generadas por las grandes longitudes de fibra. **El ruido de fase del láser** también se encontró irrelevante para los sistemas con detección coherente, ya que la variación de la FWHM no generó efectos sobre la señal.
- A pesar de estas particularidades, se encontraron condiciones específicas sobre las cuales los parámetros de desempeño tienen un comportamiento muy bueno, en los que se logró alcanzar longitudes de más de 500Kms para el enlace, a 10Gbps, con 8 y 16 canales con tan sólo 6 span; se obtuvo como caso especial un buen desempeño con 32 canales y 7 span en NRZ-OOK. Bajo estas condiciones, los ruidos que tuvieron el efecto más relevante fueron los inducidos por efectos no lineales de la fibra.
- Se comprobó que el efecto de muchos de los ruidos analizados en la sección 1.4 son irrelevantes, ya que son neutralizados por la robustez de los sistemas con detección coherente. El Ruido Relativo de Intensidad es anulado por el uso del receptor balanceado; el Ruido de Fase del Láser no genera efectos importantes comparado con el ruido de fase inducido por la SPM y la XPM; la amplificación de la señal recibida debido a la combinación de la señal con un Oscilador Local, hace que el efecto del ruido de disparo, el ruido cuántico, entre otros que en el pasado fueron relevantes, sean descartables bajo las condiciones de red del presente trabajo.
- El sistema NRZ-DPSK presenta mayor sensibilidad frente a la Dispersión Cromática que el sistema NRZ-OOK, que presenta mayor sensibilidad frente a la atenuación. Los sistemas modulados en fase también presentan mayor sensibilidad al efecto del ruido inducido por la XPM que los sistemas modulados en amplitud, pero se presenta el caso contrario para el efecto del ruido inducido por la SPM.
- Se definen como posibles soluciones en el capítulo 4, para mitigar el ruido en recepción en redes WDM con detección coherente, la modificación de: el número de canales, la longitud del span, la longitud del enlace, el tipo de amplificadores usados,

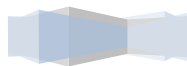


la mejora en la compensación de la dispersión, la definición de un valor de referencia para la potencia de los amplificadores, la determinación de un valor de referencia para la potencia del Oscilador Local. Estas modificaciones tienen como objetivo contrarrestar los efectos de la Dispersión Cromática y el ruido inducido por efectos no lineales. Las longitudes del span y del enlace se redujeron, el número de canales se reduce a un máximo de 16, los amplificadores se cambiaron de amp. de ganancia a amp. de potencia, se encontró un valor de referencia de 9dBm para la potencia de los amplificadores.

- El incremento de la potencia del Oscilador Local mejora el desempeño del sistema NRZ-OOK, mientras que en el sistema NRZ-DPSK la mejora es aleatoria, para algunos valores es buena y para otros no, no es proporcional al incremento de la potencia.
- En términos generales, el sistema NRZ-DPSK presenta mejor desempeño en la mayoría de los casos simulados en el presente trabajo, por lo cual debe ser más tenido en cuenta como formato de modulación preferente a la hora de mitigar el ruido sobre redes WDM con detección coherente.
- Finalmente, para mitigar el ruido en recepción para redes WDM con detección coherente, es necesario implementar soluciones que compensen lo más posible la dispersión cromática, que permitan mayores longitudes de span y de enlace con mayor número de canales y tasas de transmisión de bit más altas, a partir de contrarrestar el ruido inducido por los efectos no lineales.

5.3 Trabajo futuro

- Desarrollar y verificar una solución para la compensación de la Dispersión Cromática mediante el uso de procesamiento digital de señales que trabajen en recepción sobre la señal recién convertida de óptica a eléctrica.
- Buscar bajo condiciones más extremas (mayor cantidad de canales, mayor tasa de transmisión de bits, entre otras), valores límites para la potencia de los amplificadores y del Oscilador Local que permitan mejorar el desempeño de los sistemas NRZ-OOK y NRZ-DPSK frente al ruido.
- Implementar formatos de modulación diferentes a los utilizados en el presente trabajo, comparar los resultados obtenidos con simulaciones sobre sistemas RZ-OOK, RZ-DPSK y DQPSK, entre otros.
- Encontrar soluciones a las debilidades que aún presentan los sistemas de detección coherente, principalmente con modulación en fase, frente a los ruidos inducidos por efectos no lineales y por la dispersión cromática.

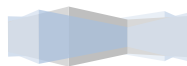


BIBLIOGRAFIA

- [1] Barry John R AND Lee Edward A, MEMBER IEEE "Performance Of Coherent Optical Receivers", Proceedings of the IEEE, VOL 78, NO.8, agosto de 1990.
- [2] Kazuro Kikuchi, "Coherent Optical Communication Systems" Department of frontier informatics, University of Tokio, Kashiwa, Chiba, Japón. 2008.
- [3] A. H. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar, J. Leuthold, C. Doerr , L Stulz, A. Agrawal, S. Banerjee S., D. Grosz, S. Hunsche, A. Kung, A. Marhelyuk, D. Maymar, M. Movassaghi, Liu, X., Xu, C., Wei, X., y Gill D. M., "2.5 Tb/S (64 X 42.7 Gb/S) Transmission Over 40 X 100 Km Nzdsf Using Rz-Dpsk Format And All-Raman-Amplified Span". In Optical Fiber Commun. Conf., postdeadline paper FC2. (2002)
- [4] Griffin R. A. and Carter A. C., "Optical Differential Quadrature Phase-Shift Key (Odqpsk) For High Capacity Optical Transmission". In Optical Fiber Commun. Conf., paper WX6. (2002)
- [5] X. Liu, X. Wei, R. E. Slusher, C. J. McKinstrie, "Improving Transmission Performance In Differential Phase-Shift-Keyed Systems By Use Of Lumped Nonlinear Phaseshift Compensation". Opt. Lett., (2002).
- [6] C. Xu, L. F. Mollenauer, and X. Liu, "Compensation Of Nonlinear Self-Phase Modulation With Phase Modulators". Electron. Lett., (2002).
- [7] T. Okoshi, K.Kikuchi, "Coherent Optical Fiber Communication", KTK Scientific Publishers 1988, University of Tokyo, Tokyo.
- [8] ITU-T Rec. G.694.1, "Spectral Grids For WDM Applications: DWDM Frequency Grid", Junio, 2002
- [9] ITU-T Rec. G.695, "Optical Interfaces For Coarse Wavelength Division Multiplexing Applications", Junio, 2002
- [10] Jimmy Kyriannis . "High Performance & Optical Networks", New York University, 2007.
- [11] C. Astudillo, N. Hernández, "Sistemas Ópticos Multicanal", Presentación, Universidad Técnica Federico Santa Maria, 2007
- [12] Joel Pedro Peixoto de Carvalho "Redes Ópticas WDM". Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores 2002.
- [13] Ramón Jesús Millán Tejedor "Estudio Y Diseño De Multiplexores Por División En Longitud De Onda (WDM) Mediante Efectos Electroópticos, Termoópticos Y Acustoópticos". Proyecto Fin de Carrera - Ingeniero de Telecomunicación ETSIT Valladolid 1998.
- [14] Bob Chomycz "Planning Fiber Optic Networks", McGraw-Hill, 2009.



- [15] Alex Gonzales – “Redes: Protocolos Y Estándares” ,2009.
- [16] página web, http://www.lightriver.com/index.php?p=cwdm_dwdm_roadm.
- [17] Keang Po Ho “Phase Modulated Systems” Institute of Communication Engineering and Department of Electrical Engineering National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, 2005.
- [18] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems” , The Institute of Optics University of Rochester Rochester: NY, 2002
- [19] Gabriel Charlet, “Coherent Detection Associated With Digital Signal Processing For Fiber Optics Communication”, Alcatel-Lucent, Bell-Labs France, Centre de Villarceaux, Route de Villejust, 2008.
- [20] Rongqing Hui, Maurice Sullivan “Fiber Optic Measurement Techniques”, Elsevier, 2009
- [21] Y. H. Cheng, and T. Okoshi. “Phase-Noise-Cancelling Dual-Frequency Heterodyne Optical Fibre Communication Systems” Electron Lett., 1989.
- [22] Henry, C. “Theory Of The Phase Noise And Power Espectrum Of Single Mode Injection Laser”, artículo IEEE, 2003.
- [23] C.D. Poole, J. Nagel, “Polarization Effects In Lightwave Systems, In: Optical Fiber Communications liia”, Academic Press, 1997, pp. 115–161.
- [24] P.M. Krummich, et al., “Field Trial Results On Statistics Of Fast Polarization Changes In Long Haul Wdm Transmission Systems”, in: OFC’05, Anaheim, CA, March 6–11, OThT6.
- [25] Le Nguyen Binh, “Digital Optical Communications”, Taylor & Francis Group, 2010
- [26] Gustavo Gómez, Juan Felipe Grijalba “Análisis Del Desempeño De Formatos De Modulación En Comunicaciones Ópticas Sobre Redes Wdm” Tesis para optar al título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones – Universidad del Cauca 2010.
- [27] ITU-T Rec. G.652, “Characteristics Of A Single-Mode Optical Fiber And Cable”, junio, 2005
- [28] OPNET, “Manual De Usuario”, septiembre, 2004
- [29] Carlos Domínguez Valente, Marco Antonio López Octaviano, Guillermina Martínez Martínez, Beatriz Martínez, Mireya Vázquez Hernández “Simulador Digital”, monografía del Tecnológico de estudios superiores de jocotitlan, 2008.
- [30] OptSim, “User Guide”, RSoft, 2009



- [31] J. Antonio Dinamarca, "Análisis del Diagrama del Ojo", Reporte técnico, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002
- [32] Joe Charles Campbell, "Advances In Photodetectors", School of Engineering and applied Science, Department of Electrical and Computer Engineering University of Virginia, Charlottesville, VA USA. 2008.
- [33] Fabian. N. Hauske, IEEE Member, Maxim Kuschnerov, IEEE Student Member, Bernhard Spinnler, and Berthold Lankl, IEEE Member, "Optical Performance Monitoring In Digital Coherent Receivers", Journal Of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 16, Agosto 15 del, 2009
- [34] Michael G. Taylor, IEEE Member " Phase Estimation Methods For Optical Coherent Detection Using Digital Signal Processing ", Journal Of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 7, April 1, 2009
- [35] Xiupu Zhang and Peixuan Jiang, "Phase-Noise-Insensitive Coherent Optical Heterodyne Cpsk Receiver With Limiter-Discriminator Detector", IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 3, No. 6, June 1991.
- [36] M.M. Banat, "Performance Analysis Of A Symbol Slicing Majority Vote Combining Receiver For Binary Optical Heterodyneask With Phase-Noise-Optimised Decision Thresholds", IEE Proc.-Optoelectron., Vol. 153, No. 4, Agosto 2006.
- [37] M. Schiess, B.S. Johansson, "Excess Noise In Heterodyne Receivers", IEEE Proceedings-J, Vol. 140, No. 3, Junio de 1993
- [38] Carlos Enrique Serrano Castaño, "Modelo Integral Para El Profesional En Ingeniería" Universidad del Cauca. Grupo en Ingeniería Telemática. Popayán – Colombia. 2008
- [39] Jhon Barry, Edward Lee "Performance Of Optical Coherent Systems", artículo IEEE, 1990
- [40] Roger S. Pressman." Ingeniería Del Software, Un Enfoque Práctico". Editorial Mc.Graw Hill, 2002.
- [41] Andy Bateman, "Comunicaciones Digitales: Diseño Para El Mundo Real", Marcombo, 2003.
- [42] Daniel Ceballos "Láseres Para Wdm". Instituto Nacional De Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) 2004.
- [43] Ricardo Arturo Gómez Barrientos "Estudio Y Análisis De Pérdidas En Redes De Fibra Óptica Basadas En El Estándar Sonet/Sdh Y Su Evolución Hacia Dwdm" Tesis para optar al título de Ingeniero Electrónico – Universidad Austral de Chile 2007.
- [44] Juan Sanchez R. "Introducción A Simulación", Universidad católica de Valparaíso, Facultad de ingeniería, 2002.