

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS NO LINEALES DE MODULACIÓN DE FASE EN FIBRAS G.653 Y G.655 Y SU RELACIÓN CON LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

ADRIAN RUBIO MENA

adrianx0213@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. María Soledad Jiménez M.Sc.

maria.jimenez@epn.edu.ec

Quito, febrero 2017

DECLARACIÓN

Yo Adrian Rubio Mena, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Adrian Rubio Mena

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Adrian Rubio Mena bajo mi supervisión.

Ing. María Soledad Jiménez M.Sc.

DIRECTORA DEL PROYECTO

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA.....	1
1.1.1 FIBRA ÓPTICA MULTIMODO DE ÍNDICE ESCALONADO [11]	2
1.1.2 FIBRA ÓPTICA MULTIMODO DE ÍNDICE GRADUAL [11]	5
1.1.3 FIBRA ÓPTICA MONOMODO [11]	6
1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA FIBRA ÓPTICA	7
1.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES [11].....	7
1.2.2 ATENUACIÓN DE UNA SEÑAL ÓPTICA [11]	8
1.2.3 DISPERSIÓN CROMÁTICA [1]	13
1.3 EFECTOS NO LINEALES.....	15
1.3.1 LONGITUD EFECTIVA Y ÁREA EFECTIVA [1] [12].....	15
1.3.2 LONGITUD NO LINEAL [1].....	17
1.3.3 LONGITUD DE DISPERSIÓN] [1]	17
1.3.4 TIPOS DE PULSOS ÓPTICOS [20] [1].....	17
1.3.5 SELF-PHASE MODULATION (SPM) [1] [12] [22] [20][19]	19
1.3.6 MODULACIÓN CRUZADA DE FASE (XPM, CROSS PHASE MODULATION)	29
1.3.7 EFECTOS NO LINEALES EN LA PROPAGACIÓN DEL PULSO [1]	40
1.4 FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO NORMALIZADAS DE DISPERSIÓN DESPLAZADA.....	43
1.4.1 FIBRA MONOMODO DE DISPERSIÓN DESPLAZADA NULA (<i>ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER</i> , NORMA G.653) [1] [15]	44
1.4.1.1 Fibra DSF G653 de la ITU [15]	47
1.4.2 FIBRA MONOMODO DE DISPERSIÓN DESPLAZADA NO NULA (<i>NZDSF; NON-ZERO DISPERSION-SHIFTED FIBER</i> , NORMA G.655)	50
1.4.4 Fibra G.655 de la ITU [16]	51
CAPÍTULO 2 SIMULACIÓN DE LOS FENÓMENOS SPM Y XPM	55
2.1 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPECTRAL	56

2.1.1	LIMITACIONES ENCONTRADAS	61
2.1.2	PROGRAMA EN MATLAB PARA CALCULAR T_L/T_0 Y $\phi_{\text{máx}}$	61
2.1.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS EJEMPLOS.....	65
2.2	SIMULACIÓN CON OPTISYSTEM.....	66
2.2.1	SIMULACIÓN DE SPM CON OPTISYSTEM	66
2.2.2	SIMULACIÓN DE XPM CON OPTISYSTEM	71
2.3	SIMULACIONES PARA SPM CON DIFERENTES TIPOS DE FIBRA.....	75
2.3.1	SIMULACIONES DE SPM PARA LA FIBRA G.653	75
2.3.2	SIMULACIONES PARA LA FIBRA G.655 C	114
2.4	SIMULACIONES PARA XPM CON DIFERENTES TIPOS DE FIBRA.....	135
2.4.1	SIMULACIONES DE XPM PARA LA FIBRA G.655.E	138
2.4.2	SIMULACIONES DE XPM PARA FIBRA G.655.C	151
2.4.3	IMPACTO DE XPM EN SISTEMA CON DIFERENTE NÚMERO DE CANALES.....	155
2.5	COMPARACIÓN DEL EFECTO SPM ENTRE FIBRAS	158
2.5.1	FIBRAS ÓPTICAS UTILIZADAS EN EL MERCADO LOCAL	169
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS Y PROPUESTA DE MECANISMOS REMEDIALES PARA SPM Y XPM.....		171
3.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA SPM.....	171
3.1.1	ANÁLISIS EN EL RÉGIMEN TEMPORAL	172
3.1.2	ANÁLISIS EN EL RÉGIMEN ESPECTRAL.....	173
3.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA XPM.....	173
3.3	MECANISMOS REMEDIALES PARA SPM.....	174
3.3.1	AUMENTO DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN	174
3.3.2	USO DE FIBRA DCF (FIBRA COMPENSADORA DE DISPERSIÓN)	180
3.4	MECANISMOS REMEDIALES PARA XPM.....	190
3.4.1	AUMENTO EN LA SEPARACIÓN ENTRE CANALES Y UTILIZACIÓN DE FIBRAS DCF	190
3.4.2	AUMENTO DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN Y SEPARACIÓN ENTRE CANALES.....	192
3.4.2	SEPARACIÓN ENTRE CANALES VARIADA	194

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	197
4.1 CONCLUSIONES	197
4.2 RECOMENDACIONES	199
BIBLIOGRAFÍA	202
ANEXOS	205
ANEXO A: Tablas con resultados numéricos de simulación.....	A1
ANEXO B: Encuestas realizadas a los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones locales.....	A 24
ANEXO C: Normas de la ITU-T G.650.2 y G.663.....	A 31

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1 Tipos de fibra Óptica [3]	2
Figura 1. 2 Fibra multimodo de índice escalonado [6]	3
Figura 1. 3 Ángulo crítico [2]	4
Figura 1. 4 Relación entre la potencia transmitida por el manto y la total en una fibra, en función del parámetro v [4]	5
Figura 1. 5 Fibra multimodo de índice gradual. a) Perfil de índices, b) rayos propagándose en el interior de la fibra [1]	5
Figura 1. 6 Modelo simplificado de la propagación de los rayos en una fibra multimodo de índice gradual [7]	6
Figura 1. 7 Relación longitud de onda (nm) vs atenuación (dB/Km) [8]	9
Figura 1. 8 Curva de atenuación de las fibras ópticas en cuatro etapas históricas [9]	10
Figura 1. 9 Curva de atenuación en fibra de silicio considerando absorciones UV, IR y Rayleigh [10].....	12
Figura 1. 10 Relación de potencia con distancia de enlace [1]	16
Figura 1. 11 Forma de pulso $m=1$ y $m=3$ [1].....	19
Figura 1. 12 a) Pulso sin chirp. b) Pulso con chirp inducido por SPM [12].....	23
Figura 1. 13 a) Fase, b) Frecuencia instantánea, c) Pulso gaussiano luego de haberse propagado una distancia $L=L_{NL}$ [1]	23
Figura 1. 14 Gráficos del cambio de la forma del espectro en función del parámetro $\phi_{m\acute{a}x}$ [13].....	26
Figura 1. 15 Ensanchamiento del pulso en función de la distancia y del parámetro β_2 [1]	28
Figura 1. 16 Espectro de dos pulsos que se propagan en una fibra óptica exhibiendo ensanchamiento espectral asimétrico inducido por XPM [13].....	34
Figura 1. 17 Espectro y fase inducido por XPM, columna izquierda y derecha respectivamente [12].....	36
Figura 1. 18 Forma (fila superior) y espectro (fila inferior) de los pulsos de prueba y bombeo, la línea punteada indica el lugar de los pulsos de entrada [12].....	37
Figura 1. 19 Espectro del pulso de prueba y de bombeo ignorando los efectos de GVD [12].....	38
Figura 1. 20 Dispersión en función de la longitud de onda [1]	45
Figura 1. 21 Índice de refracción en función de la distancia al centro del núcleo [1].....	46
Figura 1. 22 Índice de refracción en función de la distancia al núcleo [1]	51

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 1mW	59
Figura 2. 2 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 10mW	60
Figura 2. 3 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 20mW	60

Figura 2. 4 Resultado gráfico de T_L/T_0 para una velocidad de 20Gbps a una distancia de 20km	61
Figura 2. 5 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 10mW en Matlab.....	63
Figura 2. 6 Resultado del programa en Matlab para T_L/T_0 aquí llamado chirp	63
Figura 2. 7 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 10mW en Matlab.....	63
Figura 2. 8 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 20mW en Matlab	64
Figura 2. 9 Resultado del programa EN Matlab para 510mW con una velocidad de transmisión de 20Gbps y una distancia de 20km en Matlab.....	64
Figura 2. 10 Diagrama empleado para la simulación de SPM	67
Figura 2. 11 Resultado de la simulación de SPM para el caso 1	68
Figura 2. 12 Resultado espectral de la simulación para SPM para el caso 1	69
Figura 2. 13 Resultado de la simulación para SPM para el caso 2.....	70
Figura 2. 14 Resultado espectral de la simulación para SPM para el caso 2	71
Figura 2. 15 Diagrama para la simulación de XPM	72
Figura 2. 16 Resultado de la simulación para XPM para el caso 1.....	74
Figura 2. 17 Resultado espectral de la simulación para XPM para el caso 1	74
Figura 2. 18 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	77
Figura 2.19 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	77
Figura 2.20 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$ a) señal inicial, b) señal resultante	78
Figura 2.21 Resultado de la relación T_L/T_0 para 100km $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$	79
Figura 2. 22 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$, a) señal inicial, b) señal final	80
Figura 2. 23 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	80
Figura 2. 24 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=40\text{mW}$.(a) forma temporal, (b) forma espectral.	81
Figura 2. 25 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$.(a) señal inicial, (b) señal resultante	82
Figura 2. 26 Resultado de la simulación para un solo pulso para $L=100\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$	82
Figura 2. 27 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$ $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral	83
Figura 2. 28 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	84
Figura 2. 29 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	85

Figura 2. 30 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	86
Figura 2. 31 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	86
Figura 2. 32 Resultado de la simulación para $L=21\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	87
Figura 2. 33 Resultado de la simulación para $L=30\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	88
Figura 2. 34 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t= 80\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	89
Figura 2. 35 Resultado de la simulación para $L=15\text{km}$, $V_t= 80\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	89
Figura 2. 36 Resultado de la simulación para $L=5\text{km}$, $V_t= 100\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	90
Figura 2. 37 Resultado de la simulación para $L=6\text{km}$, $V_t= 100\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	91
Figura 2. 38 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t= 100\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	92
Figura 2. 39 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 100\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$	92
Figura 2. 40 Resultado de la simulación para $L=1\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	93
Figura 2. 41 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) Señal inicial, (b) señal resultante.....	94
Figura 2. 42 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) Señal inicial, (b) señal resultante.....	95
Figura 2. 43 Resultado de la simulación para $L=1\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma espectral, (b) forma temporal.	96
Figura 2. 44 Gráfico de la relación T_L/T_0 para $L=1\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$	96
Figura 2. 45 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$	97
Figura 2. 46 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. a) Para un solo pulso, b) para dos pulsos.	98
Figura 2. 47 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$	99
Figura 2. 48 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	100
Figura 2. 49 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	100
Figura 2. 50 Resultado de la simulación para $L=55\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	101
Figura 2. 51 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	102

Figura 2. 52 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	103
Figura 2. 53 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	103
Figura 2. 54 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	104
Figura 2. 55 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	105
Figura 2. 56 Resultado de la simulación para $L=70\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	105
Figura 2. 57 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	106
Figura 2. 58 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	107
Figura 2. 59 Resultado de la simulación para $L=20\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	107
Figura 2. 60 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.	108
Figura 2. 61 resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	109
Figura 2. 62 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$.(a) Forma temporal, (b) forma espectral.	110
Figura 2. 63 Resultado de la simulación para $L=1\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	111
Figura 2. 64 Resultado de la simulación para $L=5\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	111
Figura 2. 65 Resultado de la simulación para $L=6\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	112
Figura 2. 66 Resultado de la simulación para $L=5\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	113
Figura 2. 67 Resultado de la simulación para $L=6\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	113
Figura 2. 68 Forma de la señal inicial para la simulación en fibra G.655.....	114
Figura 2. 69 Resultado de la simulación para $L=39\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva.(a) Forma temporal, (b) forma espectral.	115
Figura 2. 70 Figura 2.71 Resultado de la simulación para $L=44\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	116
Figura 2. 71 Resultado de la simulación para $L=17\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal,(b) forma espectral.	117

Figura 2. 72 Resultado de la simulación para $L=19\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva.(a) Forma temporal, (b) forma espectral. 117

Figura 2. 73 Resultado de la simulación para $L=6\text{km}$, $V_t= 100\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva.(a) Forma temporal, (b) forma espectral. 118

Figura 2. 74 Resultado de la simulación para $L=37\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa.(a) Forma temporal,(b) forma espectral. 119

Figura 2. 75 Resultado de la simulación para $L=36\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa.(a) Forma temporal,(b) forma espectral. 120

Figura 2. 76 Resultado de la simulación para $L=36\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa.(a) Forma temporal,(b) forma espectral. 120

Figura 2. 77 Resultado de la simulación para $L=15\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa.(a) Forma temporal,(b) forma espectral. 121

Figura 2. 78 Resultado de la simulación para $L=5\text{km}$, $V_t= 100\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa.(a) Forma temporal,(b) forma espectral. 122

Figura 2. 79 Resultado de la simulación para $L=32\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal,(b) forma espectral. 123

Figura 2. 80 Resultado de la simulación para $L=35\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva.(a) Forma temporal,(b) forma espectral. 124

Figura 2. 81 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. . 124

Figura 2. 82 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. . 125

Figura 2. 83 Resultado de la simulación para $L=3\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. . 126

Figura 2. 84 Resultado de la simulación para $L=32\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 127

Figura 2. 85 Resultado de la simulación para $L=28\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 127

Figura 2. 86 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 128

Figura 2. 87 Resultado de la simulación para $L=7\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 129

Figura 2. 88 Resultado de la simulación para $L=3\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 129

Figura 2. 89 Resultado de la simulación para $L=69\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 130

Figura 2. 90 Resultado de la simulación para $L=16\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 131

Figura 2. 91 Resultado de la simulación para $L=4\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. 132

Figura 2. 92 Resultado de la simulación para $L=1\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.	132
Figura 2. 93 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t=10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. .	133
Figura 2. 94 Resultado de la simulación para $L=14\text{km}$, $V_t=20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. .	134
Figura 2. 95 Resultado de la simulación para $L=2\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral. .	135
Figura 2. 96 Diagrama de simulación para XPM	136
Figura 2. 97 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, longitud de onda central 1525nm , 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=200\text{mW}$	138
Figura 2. 98 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, longitud de onda lateral 1523.49nm , 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=200\text{mW}$	139
Figura 2. 99 Resultado de espectro de la simulación para XPM, $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión	139
Figura 2. 100 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=60\text{mW}$	140
Figura 2. 101 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$	141
Figura 2. 102 Resultado espectral de la simulación para XPM. $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. a) Espectro inicial, b) espectro resultante	141
Figura 2. 103 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=10\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	142
Figura 2. 104 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=60\text{mW}$	143
Figura 2. 105 Resultado temporal de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=50\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	144
Figura 2. 106 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$,	144
Figura 2. 107 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=50\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$	145
Figura 2. 108 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	146
Figura 2. 109 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	146
Figura 2. 110 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$	147
Figura 2. 111 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$	147

Figura 2. 112 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. (a) en ausencia de SPM y XPM, (b) únicamente la presencia de SPM, (c) presencia de SPM y XPM	148
Figura 2. 113 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	149
Figura 2. 114 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$	149
Figura 2. 115 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$	150
Figura 2. 116 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. a) Señal WDM inicial, (b) señal WDM final	150
Figura 2. 117 Señal inicial para simulación de XPM con $V_t=40\text{Gbps}$	151
Figura 2. 118 Resultado temporal de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$. a) 1525.6nm , b) 1525nm	152
Figura 2. 119 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	152
Figura 2. 120 Resultado de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$. a) En ausencia de SPM, b) únicamente presencia de SPM, c) Presencia de SPM y XPM.	153
Figura 2. 121 Resultado de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. , a) únicamente presencia de SPM, b) Presencia de SPM y XPM.	154
Figura 2. 122 Resultado de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $D(\lambda)=-3\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=100\text{mW}$	154
Figura 2. 123 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $L=80\text{km}$ $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=200\text{mW}$, a) 192.6THz b) 193THz c) 192.8THz d) 193.2THz e) 193.4THz	156
Figura 2. 124 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=50\text{GHz}$, $L=1\text{km}$ $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=200\text{mW}$, a) 193THz b) 192.8THz c) 193.05THz d) 193.45THz e) 192.9THz f) 193.3THz	158
Figura 2. 125 Resultado espectral de la señal WDM con 14 canales	158
Figura 2. 126 Señal inicial para la comparación entre fibras	159
Figura 2. 127 comparativa de SPM para el caso 1, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	161
Figura 2. 128 comparativa de SPM para el caso 2, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	162
Figura 2. 129 comparativa de SPM para el caso 3, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	163

Figura 2. 130 comparativa de SPM para el caso 4, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	164
Figura 2. 131 comparativa de SPM para el caso 5, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	165
Figura 2. 132 comparativa de SPM para el caso 6, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	166
Figura 2. 133 comparativa de SPM para el caso 7, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	167
Figura 2. 134 comparativa de SPM para el caso 8, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656.....	168

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1 Resultado de las curvas T_L/T_0 para el caso de $P_0=10\text{mW}$ (a), y para $P_0=40\text{mW}$ (b)	175
Figura 3. 2 Forma del pulso con las condiciones del caso 5.1 sección 2.3.1.1 para $\lambda=1525\text{nm}$ y $P_0=10\text{mW}$, la línea celeste corresponde a la señal inicial y la línea azul a la señal final.....	176
Figura 3. 3 Forma del pulso con las condiciones del caso 5.1 sección 2.3.1.1, para $\lambda=1525\text{nm}$ aumentando la potencia a $P_0=40\text{mW}$. La línea celeste corresponde a la señal inicial y la línea azul a la señal final.	176
Figura 3. 4 Resultado de la curva para el caso de $P_0=200\text{mW}$	177
Figura 3. 5 Forma del pulso con las condiciones del caso 5.1 sección 2.3.1.1, para $\lambda=1525\text{nm}$ aumentando la potencia a $P_0=200\text{mW}$, la línea celeste corresponde a la señal inicial y la línea azul a la señal final.	177
Figura 3. 6 Resultado para el caso 2.4 de la sección 2.3.1.1 para $\lambda=1525\text{nm}$..	178
Figura 3. 7 Resultado de la relación T_L/T_0 para $\lambda=1525\text{nm}$ con $P_0=150\text{mW}$...	178
Figura 3. 8 Forma del pulso incidente para el 2.4 de la sección 2.3.1.1	179
Figura 3. 9 Forma del pulso con las condiciones del caso 2.4 de la sección 2.3.1.1, aumentando la potencia a 150mW	179
Figura 3. 10 Espectro del pulso con las condiciones del caso 2.4 de la sección 2.3.1.1, aumentando la potencia a 150mW	180
Figura 3. 11 Resultado del software implementado para las condiciones del caso 2.4 de la sección 2.3.1.1, aumentando la potencia a 150mW	180
Figura 3. 12 Señal inicial para comprobación de mecanismo remedial con fibras DCF	181
Figura 3. 13 Resultado de la simulación para SPM, con $V_t=40\text{Gbps}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	182
Figura 3. 14 Diagrama de transmisión utilizando fibra DCF.....	182
Figura 3. 15 Resultado de la simulación para SPM utilizando fibra DCF, con $V_t=40\text{Gbps}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$	183

Figura 3. 16 Diagrama de transmisión utilizando fibra DCF a una distancia de 50km	183
Figura 3. 17 Resultado de la simulación para SPM utilizando fibra DCF en varias secciones, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=10\text{mW}$	184
Figura 3. 18 Diagrama de simulación para XPM utilizando fibras DCF	184
Figura 3. 19 Señal inicial para comprobación de mecanismo remedial usando fibras DCF para $\lambda=1550\text{nm}$	185
Figura 3. 20 Señal inicial para comprobación de mecanismo remedial usando fibras DCF para $\lambda=1523.49\text{nm}$	186
Figura 3. 21 Resultado de WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, longitud de onda central (a), longitud de onda inferior (b)	186
Figura 3. 22 Resultado de la simulación utilizando fibra DCF en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, longitud de onda central (a), longitud de onda inferior (b).....	186
Figura 3. 23 Resultado de la simulación para SPM, con $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{km}$. a) En ausencia de SPM, b) con SPM incluido.....	187
Figura 3. 24 Resultado de la simulación para SPM utilizando fibra DCF, con $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{km}$	188
Figura 3. 25 Resultado del espectro utilizando fibra DCF, con $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{km}$. a) señal inicial, b) señal final	188
Figura 3. 26 Resultado de la simulación WDM fibra DCF, $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=100\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$	189
Figura 3. 27 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=100\text{GHz}$	189
Figura 3. 28 Resultado del espectro WDM, fibra DCF, $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=100\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$	190
Figura 3. 29 Resultado de aumentar la separación entre canales en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=350\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$	191
Figura 3. 30 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=350\text{GHz}$. a) señal inicial, b) señal final	191
Figura 3. 31 Resultado del espectro en WDM utilizando fibra DCF, con $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=350\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$, c) espectro.....	192
Figura 3. 32 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $P_0=100\text{mW}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$, c) espectro.....	193

Figura 3. 33 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, D(λ)=3ps/nm.km, P ₀ =400mW, L= 25Km, Δf = 200GHz, P ₀ =100mW. a) λ =1523.49nm, b) λ =1523.49nm	193
Figura 3. 34 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, D(λ)=3ps/nm.km, P ₀ =400mW, L= 25Km, Δf = 100GHz, P ₀ =40mW. a) λ =1523.49nm, b) λ =1523.49nm	194
Figura 3. 35 Resultado de simulación para diferentes separaciones entre canales. a) 193THz b) 192.8THz c) 192.9THz d) 193.3THz e) 193.4THz f) 193.60THz ..	195
Figura 3. 36 Espectro de señal WDM para diferentes separaciones entre canales	196

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tabla de características de la fibra G.653 A [15]	49
Tabla 1.2 Tabla de características de la fibra G.653 B [15]	50
Tabla 1.3 Tabla de características de la fibra G.655 C [16]	53
Tabla 1.4 Tabla de características de la fibra G.655 D [16]	54
Tabla 1.5 Tabla de características de la fibra G.655 E [16]	55
Tabla A.1 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.653.A.....	A3
Tabla A. 2 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.653.A.....	207
Tabla A. 3 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C(+NZ-DSF)	A4
Tabla A. 4 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C(-NZ-DSF)	A5
Tabla A. 5 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C(+NZ-DSF)	A6
Tabla A. 6 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C (-NZ-DSF)	A7
Tabla A. 7 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C(+NZ-DSF)	A8
Tabla A. 8 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C(-NZ-DSF)	A9
Tabla A. 9 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (+NZ-DSF)	A10
Tabla A. 10 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D(-NZ-DSF)	A11
Tabla A. 11 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (+NZ-DSF)	A12
Tabla A. 12 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (-NZ-DSF)	A13
Tabla A. 13 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (+NZ-DSF)	A14
Tabla A. 14 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (-NZ-DSF)	A15
Tabla A. 15 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)	A16
Tabla A. 16 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (-NZ-DSF)	A17
Tabla A. 17 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)	A18

Tabla A. 18 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)	A19
Tabla A. 19 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (-NZ-DSF)	A20
Tabla A. 20 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)	A21
Tabla A. 21 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (-NZ-DSF)	A22

RESUMEN

Actualmente uno de los medios de transmisión más utilizado en el mundo es la fibra óptica por sus grandes prestaciones como: altas velocidades de transmisión, gran ancho de banda, entre otras. Sin embargo conforme avanza la tecnología, las velocidades de transmisión aumentan y es cuando efectos no lineales (antes inexistentes) empiezan a tomar importancia.

En el primer capítulo de este trabajo de titulación se realiza el estudio de los parámetros y los fenómenos relacionados con SPM (*Self-Phase Modulation*) y XPM (*Cross-Phase Modulation*), tales como son: Atenuación, Dispersión, Scattering. También se realiza un análisis de las ecuaciones involucradas en SPM y XPM, así como su impacto en la forma temporal y espectral de pulsos Gaussianos.

En el segundo capítulo se realiza la simulación de los efectos no lineales SPM y XPM. Para ello previamente se realizan ejemplos de utilización de las ecuaciones vistas en la teoría relacionada, y verificación del correcto funcionamiento de todas las herramientas de software utilizado. Este capítulo tiene la finalidad de determinar las condiciones en las que los efectos no lineales empiezan a manifestarse. Las fibras ópticas utilizadas para este estudio son esencialmente las normadas por la ITU: G.653 y G.655, por ser las más utilizadas en el mercado, sin embargo, y para fines de comparación, también se hace un breve análisis del impacto de estos efectos no lineales en las fibras normadas por la ITU: G.652, G.654, G.656; utilizando las mismas condiciones de transmisión con el fin de observar cómo se degrada la señal en cada una de las fibras ópticas.

En el tercer capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el segundo capítulo, de esta manera se identifican aquellos parámetros y condiciones en los que los efectos no lineales toman importancia. En este capítulo también se analizan mecanismos remediales para mitigar o eliminar si es posible el impacto de SPM y XPM, además se incluyen simulaciones para comprobar que estos mecanismos son eficaces.

En el cuarto y último capítulo se realiza una recopilación de conclusiones obtenidas como resultado de este estudio, también se proponen algunas recomendaciones tanto para un futuro estudio como consideraciones para aplicar los mecanismos remediales.

PRESENTACIÓN

En la actualidad la fibra óptica es uno de los medios de transmisión más utilizados gracias a sus grandes prestaciones como son: elevadas distancias de cobertura, baja atenuación, gran ancho de banda. Conforme avanza la tecnología la velocidad de transmisión, utilizando este medio, es cada vez mayor así como la distancia a la que se transmite, es por ello que en estas nuevas condiciones las señales transmitidas por este medio pueden estar expuestas a efectos no lineales.

El presente proyecto tiene como finalidad el estudio de fenómenos no lineales SPM (*Self-Phase Modulation*) y XPM (*Cross-Phase Modulation*) que aparecen en la fibra óptica al utilizar altas velocidades de transmisión y potencias elevadas. Lo que se pretende con este estudio es determinar las condiciones en la que estos efectos empiezan a tomar importancia para posteriormente encontrar mecanismos remediales que eliminen o mitiguen el impacto de estos fenómenos no lineales.

Para realizar este estudio se ha optado por el software de simulación “OptiSystem” por ser una herramienta que permite la simulación de los efectos no lineales con una interfaz amigable, además este software utiliza el modelamiento matemático que se ha utilizado en este proyecto.

Para poder comprender cómo se relaciona el efecto SPM con XPM, se realiza un análisis de todos los parámetros que influyen en cada uno de los efectos mediante variadas simulaciones tomando en cuenta diversas condiciones de transmisión.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La introducción de la luz en un medio confinado, en este caso la fibra óptica, implica la aparición de fenómenos que tienen lugar en el interior de la misma, en primer lugar el pulso de luz tendrá características determinadas por el emisor que la generó, entre las más importantes tenemos: su duración, su potencia, su longitud de onda y la anchura espectral. Dependiendo del tipo de fibra óptica (monomodo o multimodo) aparecerá o no una primera distorsión en la señal transmitida. En la fibra multimodo toda la potencia incidente es repartida en los diferentes modos, cada modo toma un tiempo diferente en recorrer toda la fibra, en consecuencia a los diferentes modos les tomará distintos tiempos para recorrer una cierta distancia, es decir el pulso óptico se habrá ensanchado temporalmente a este fenómeno se le denomina dispersión intermodal o modal y sólo aparece en las fibras multimodo. En cada uno de los modos que se transmiten aparece un conjunto de fenómenos a los cuales se les denomina dispersión intramodal, la cual se deriva de las características tanto de los materiales como de la geometría de la fibra óptica, que se revisarán a continuación.

1.1 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA [31]

En la figura 1.1 se muestran los tipos de fibra óptica, denominados en virtud de sus características de transmisión, multimodo de índice escalonado, multimodo de índice gradual, monomodo de índice escalonado. La diferencia entre ellos como se puede apreciar radica en el diámetro de su núcleo y en la variación del índice de refracción; el diámetro del núcleo para la fibra multimodo se encuentra por encima de las 50 micras, mientras que en el caso de la fibra monomodo se encuentra típicamente por debajo de las 10 micras. Cabe destacar que una misma fibra óptica puede

comportarse tanto como monomodo o multimodo, dependiendo de la longitud de onda de la radiación óptica que se propague por ella.

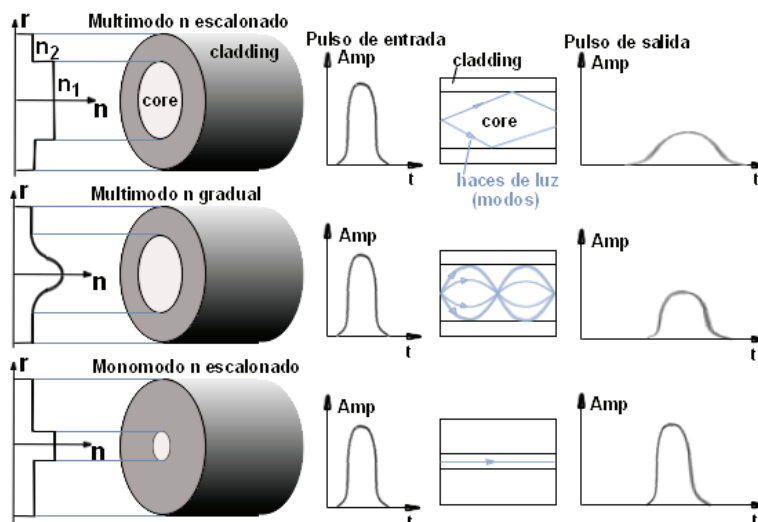


Figura 1. 1 Tipos de fibra Óptica [3]

De acuerdo con la condiciones para el guiado de una radiación óptica, la zona por la que ésta se va a propagar ha de tener un índice de refracción superior al de la zona que le rodea, en la figura 1.1 se puede observar la variación del índice de refracción. Las diferencias entre los índices de refracción del manto y del núcleo se encuentran entorno a las centésimas siendo valores comprendidos entre 0.01 y 0.02, rodeando el manto se encuentra otro medio, recubrimiento de plástico o cualquier otro material equivalente; el índice de refracción del mismo podrá ser inferior o superior al del manto, independientemente del caso nunca influirá en la transmisión, ya que el radio del manto es lo suficientemente grande como para considerarlo infinito [31].

1.1.1 FIBRA ÓPTICA MULTIMODO DE ÍNDICE ESCALONADO [11]

La transmisión en una fibra óptica multimodo de índice escalonado se lleva a cabo mediante una serie de modos que se pueden representar como caminos zigzagueantes, cómo aparecen en la figura 1.2, también se muestra las posibles formas en las que un haz de luz puede ingresar en la fibra óptica. Según la ley de Snell, la luz contenida en un cono a la entrada de la fibra óptica, pasaría a convertirse en otro con un ángulo distinto en el interior de la fibra, de toda la

radiación incidente únicamente llegará a propagarse aquella que está limitada por un ángulo crítico.

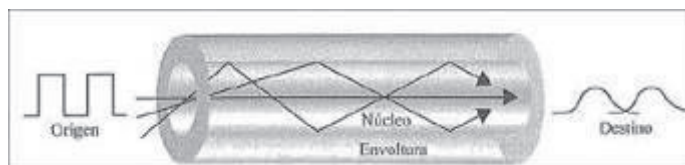


Figura 1. 2 Fibra multimodo de índice escalonado [6]

En la figura 1.3 se puede observar que uno de los rayos incidentes ingresa con un ángulo inferior al ángulo crítico desde el punto A, éste se propaga a través de la fibra hasta llegar al punto B en donde es refractado y pasa al cladding, también llamado manto o revestimiento, se propaga hasta llegar al punto C en donde es refractado nuevamente y sale al exterior, en la figura se lo puede identificar cómo “rayo perdido”, este rayo debido a que no está confinado en la fibra óptica no es transmitido a través de la misma.

Para el caso del segundo rayo, éste se propaga hasta llegar al punto B', aquí ocurre una reflexión total y el rayo es confinado en el núcleo de la fibra. El ángulo de incidencia crítico a la interfaz núcleo-manto es denominado θ_c .

Un haz incidente con un ángulo mayor a θ_c se va a propagar dentro del núcleo la fibra. Se puede observar en la figura, un haz de luz con un ángulo de incidencia a la interfaz núcleo-manto θ_c que forma un ángulo θ_1 con el centro del núcleo, los rayos que inciden con un ángulo mayor a θ_1 con respecto al centro del núcleo de la fibra no se propagarán por la misma. En la figura 1.3 se puede notar también que $\theta_2 > \theta_1$, θ_2 existe dentro de la fibra pero no está confinado en la fibra. θ_c es denominado el ángulo de propagación crítico con respecto a la normal en la superficie de separación núcleo-manto.

El cono de admisión mostrado en la figura indica el ángulo máximo de incidencia del rayo de luz hacia la fibra, el ángulo máximo con el que un rayo de luz puede ingresar a la fibra es denominado θ_a [31] [6].

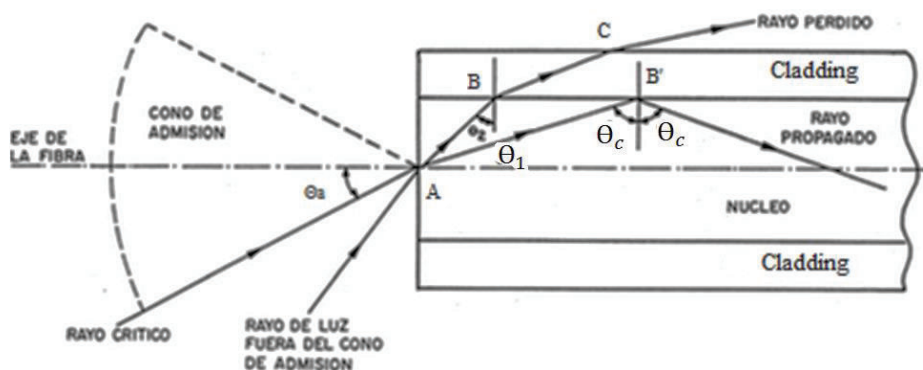


Figura 1.3 Ángulo crítico [2]

El número de modos que pueden propagarse a través de una fibra óptica de este tipo viene dada por la ecuación: $M_c = \frac{\nu^2}{2}$, el subíndice c indica que es un medio circular, el parámetro ν es la frecuencia normalizada de la fibra y es un parámetro adimensional. Se puede observar que en el caso de un valor de ν inferior a 2 el número de modos posibles a propagarse sería menor a la unidad, esto quiere decir que no es posible ese caso. En realidad el valor que conduce a la propagación de un único modo es $\nu \leq 2.4$, en esta condición se tiene una transmisión monomodal y la fibra se denomina fibra monomodo de índice escalonado, en el caso que ν tenga un valor mayor a 2.4 se tendrá una transmisión multimodal en la cual la fibra es denominada fibra multimodo.

El valor de ν tiene una gran importancia a la hora de determinar la potencia que se propagará por el núcleo de la fibra. Como se sabe parte de cada modo que es propagado aparece en el manto a manera de campo evanescente, realizando el cociente entre la potencia propagada en el manto con la potencia total, el resultado es el que observamos en la figura 1.4, según aumenta el número de modos, los de menor índice tienen una potencia mayor transmitida por el núcleo, para valores de " ν " mayores a 8 toda la potencia discurre en el manto.

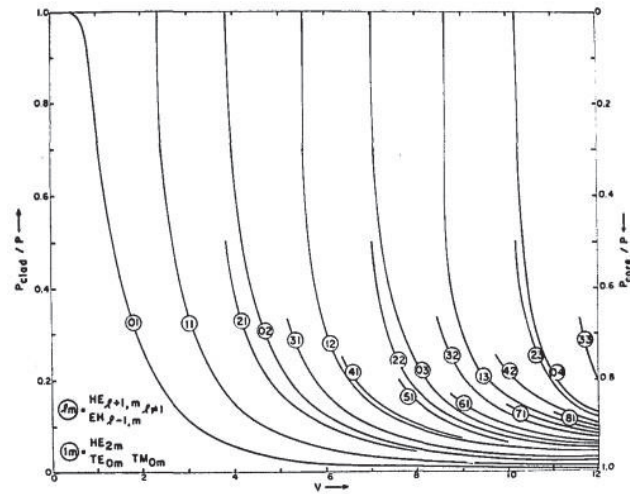


Figura 1. 4 Relación entre la potencia transmitida por el manto y la total en una fibra, en función del parámetro v [4]

1.1.2 FIBRA ÓPTICA MULTIMODO DE ÍNDICE GRADUAL [11]

A diferencia de las fibras de índice escalonado, en las fibras ópticas de índice gradual el índice de refracción en el núcleo va disminuyendo desde un valor máximo, situado en el eje de la fibra, hasta un mínimo situado en el manto. Para analizar la propagación de la luz a través de este tipo de fibra óptica se tomará como punto de partida un eje bidimensional, en la figura 1.5 se supone que el índice de refracción del núcleo disminuye de valor con la distancia al eje r . Para $|r| \leq a$, siendo "a" el radio del núcleo, el rayo de luz que se propaga a través de este tipo de fibra va sufriendo una deflexión progresiva en su camino, de esta forma la trayectoria que tiene es del tipo ondulatorio como se puede apreciar en la figura 1.5 (b).

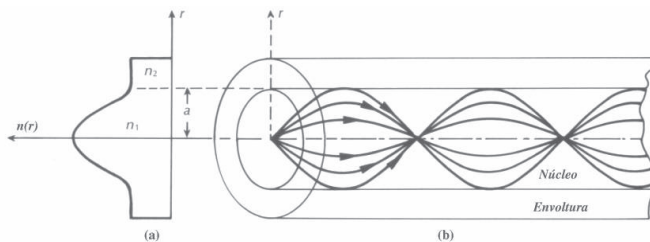


Figura 1. 5 Fibra multimodo de índice gradual. a) Perfil de índices, b) rayos propagándose en el interior de la fibra [1]

La figura 1.6 muestra el comportamiento de los rayos de luz, este es un modelo aproximado donde la variación del índice gradual se ha transformado en una variación discreta, compuesta por varias capas de dimensiones infinitesimales, cada una con un determinado índice de refracción constante y diferente con relación a los adyacentes en una medida muy pequeña, de esta forma el rayo de luz sufrirá los efectos análogos que sufre en una fibra de índice escalonado, así el rayo de luz que tiene un ángulo de incidencia inferior al ángulo crítico (visto desde la interfaz núcleo-manto) sufrirá una refracción parcial y pasará a la capa siguiente con un ángulo mayor.

Esto sucederá continuamente hasta que alcance un ángulo superior al ángulo crítico en donde se producirá una reflexión total.

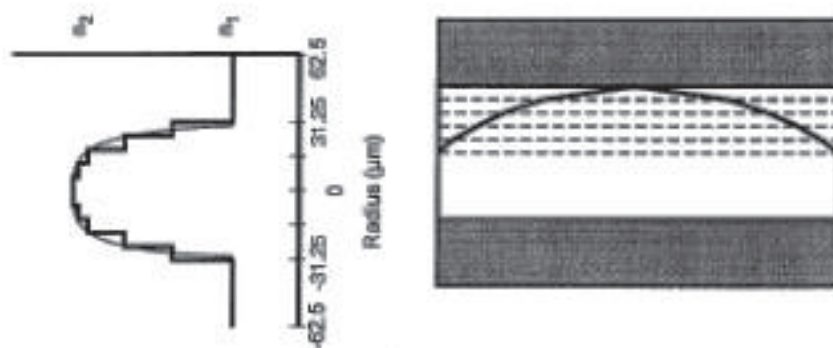


Figura 1. 6 Modelo simplificado de la propagación de los rayos en una fibra multimodo de índice gradual [7]

1.1.3 FIBRA ÓPTICA MONOMODO [11] [18]

En este tipo de fibra óptica como su nombre lo indica, solo se propaga un modo por lo que se evita la dispersión modal (que es consecuencia de la diferencia entre velocidad de propagación de los diferentes modos que se propagan por la fibra).

El diámetro de este tipo fibra es de aproximadamente 9 micrómetros, este echo permiten alcanzar grandes distancias y transmitir elevadas tasas de información.

Debido al tamaño reducido del diámetro del núcleo este tipo de fibras necesitan un tratamiento más cuidadoso comparado con las fibras multimodo.

1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA FIBRA ÓPTICA

Hemos considerado a la fibra óptica en condiciones ideales, no obstante una fibra óptica está fabricada con diferentes materiales y como tal, sus propiedades físicas también son variables, lo cual produce cambios en la propagación de la luz.

1.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES [11]

El material más utilizado en la actualidad para la construcción de fibras ópticas es el sílice, es por ello que se revisarán las propiedades del sílice y cómo se adaptan a las necesidades de transmisión, de manera que dividiremos el estudio en dos bloques: el primer bloque corresponde a la atenuación que sufre la señal a través de este medio y el otro bloque analiza cómo el propio material altera las características de un pulso de luz que se está propagando a través de este material.

En el primer bloque puede verse que la raíz de las posibles pérdidas provienen de dos fuentes, una de ellas son las pérdidas intrínsecas correspondientes al propio material (sílice); y, la otra son factores externos tales como pueden ser impurezas en la fibra o defectos estructurales en la fibra y se les denomina pérdidas extrínsecas.

Las pérdidas extrínsecas pueden llegar a desaparecer con los debidos cuidados al momento de fabricación, en cambio las pérdidas intrínsecas son imposibles de hacerlas desaparecer debido a que son propiedades del material, lo que marca límites físicos por debajo de los cuales es imposible descender.

En el segundo bloque se encuentran los comportamientos no lineales que son función de la longitud de onda del haz incidente, y su intensidad, estos efectos no eran muy significativos y tenían poca importancia en las primeras generaciones de comunicaciones ópticas; debido a las nuevas tecnologías, las nuevas condiciones y requisitos que se han planteado, actualmente estos fenómenos son la base de las aplicaciones y a veces de problemas antes inexistentes.

1.2.2 ATENUACIÓN DE UNA SEÑAL ÓPTICA [11]

Las propiedades físicas de un material imponen condiciones para cualquier radiación que se propague a través de éste. La composición de un material tanto como la composición atómica y la distribución de los átomos en el mismo, dan lugar a una serie de frecuencias de resonancia que determinan valores que toman algunos de sus parámetros físicos, uno de estos parámetros es la atenuación.

Los principales mecanismos por los cuales surgen pérdidas en una radiación transmitida que se desplaza a través de una fibra óptica son: absorción, dispersión (scattering) y la radiación perdida hacia el exterior.

La medida de las pérdidas, independientemente del tipo de pérdida, vendrá dada en decibelios (dB), para obtener este valor se debe medir la potencia óptica P_e a la entrada de la fibra y la potencia de salida P_s , tras haber recorrido una cierta distancia L , con estos valores se tendrá la atenuación α [11].

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{P_e}{P_s} \right). \quad (1.1)$$

1.2.2.1 Absorción [11]

Existen dos motivos por los que se producen pérdidas por absorción, por el propio material y por impurezas que pueda contener. Como es sabido, los electrones en un átomo pueden pasar de un nivel atómico de energía a uno superior que se encuentre desocupado, cada salto da lugar a absorción de energía por ende a pérdidas.

Si consideramos a un material constituido por átomos se puede distribuirlos de una forma amorfa (no cristalina), el equivalente al caso anterior no serían niveles de energía sino bandas de energía en los que se podrían tener los fenómenos análogos al caso atómico.

En este caso tendríamos saltos entre bandas, sin embargo aún podremos llamarlos saltos electrónicos. La mayor parte de estos saltos ocurren en la región ultravioleta y

su borde inferior con la región de luz visible. En la figura 1.7 se puede observar que para longitudes por encima de $1\mu\text{m}$ la influencia de la absorción ultravioleta es casi nula (línea punteada).

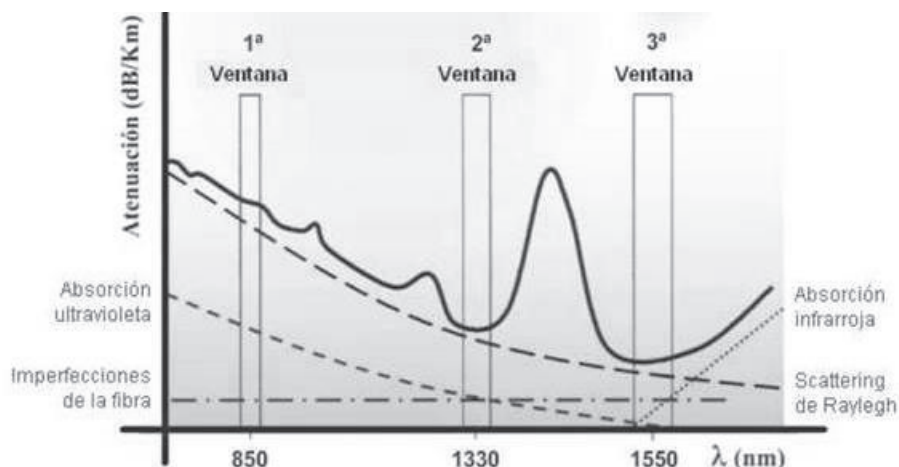


Figura 1. 7 Relación longitud de onda (nm) vs atenuación (dB/Km) [8]

En el caso de la región infrarroja aparece un nuevo fenómeno, el producto de las posibles vibraciones de los enlaces entre átomos que constituyen el material, en este caso el dióxido de silicio, como resultado de la interacción entre estos enlaces y un campo electromagnético a la frecuencia adecuada, se traduce en un nuevo tipo de absorción con las consiguientes pérdidas. Este tipo de absorción puede llegar a tener valores relativamente altos debido al gran número de enlaces presentes en la fibra. En la figura 1.7 puede observarse la curva aproximada de absorción en la región infrarroja, cuyo mínimo se encuentra en $1.5\mu\text{m}$.

El conjunto de estos dos fenómenos constituyen las denominadas pérdidas intrínsecas, y son las mínimas que podrían aparecer en cualquier tipo de fibra independientemente de la tecnología utilizada para fabricarse.

Conjuntamente con este tipo de pérdidas se encuentran las que proceden de la situación real del material empleado en la fabricación, debido a las condiciones en las que ésta se lleva a cabo es imposible asegurar que no se hayan introducido impurezas en el sílice. Estas impurezas darán lugar a los mismos fenómenos que se han visto anteriormente, por lo que dependiendo del tipo de átomos que hayan

penetrado en la fibra, surgirán bandas de absorción en determinadas zonas del espectro.

Las principales impurezas que se han encontrado y que han dado lugar a las pérdidas por absorciones extrínsecas, han sido los iones de algunos metales de transición, como el hierro, cobalto, cobre e iones OH. Esta atenuación no será uniforme en todo el espectro, el principal pico de absorción del OH se encuentra cerca de los $2.7\mu\text{m}$ y los armónicos del mismo (sobretonos) están en 1400, 950 y 725 nm. En estas longitudes de onda se producen los principales picos de absorción y las zonas situadas entre éstos son conocidas como primera, segunda y tercera ventana. En la figura 1.8 se puede observar las ventanas y los correspondientes picos de absorción según como se han desarrollado las fibras ópticas a través de los años, pudiéndose observar que para finales de los noventa los picos de absorción casi han desaparecido.

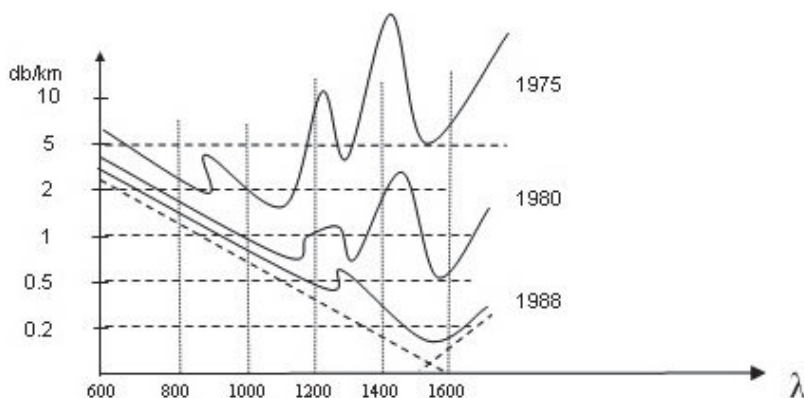


Figura 1. 8 Curva de atenuación de las fibras ópticas en cuatro etapas históricas [9]

1.2.2.2 Scattering [17]

El material del cual está construida la fibra no es el único que da a lugar a pérdidas en ella, toda irregularidad en su estructura, por muy pequeña que sea, provoca que la luz sufra una serie de fenómenos como la dispersión de la luz incidente hacia una dirección diferente a la inicial, esto se debe a la interacción de las ondas de luz con las irregularidades estructurales. Estas irregularidades pueden ser huecos,

diferencias de densidad o de material, o variaciones en la configuración estructural. El tipo de interacción variará de acuerdo a la longitud de onda de la radiación incidente en relación con el tamaño de la irregularidad.

Se consideran dos casos, el primero en donde la longitud de onda es mucho menor que dichas irregularidades y el segundo donde será mayor. El primer caso se le conoce como scattering de Rayleigh y el segundo se le conoce como scattering de Mie.

1.2.2.2.1 Scattering de Rayleigh [12]

En este caso se considera las no uniformidades menores a $1\mu\text{m}$, ya sean de constante dieléctrica, densidad o índice de refracción. Las variaciones pueden agruparse en dos grupos aproximadamente independientes: uno depende de las fluctuaciones de la densidad del material y otro que lo hace de la composición del material.

$$\alpha_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^3} (n^2 - 1)^2 K T_f \beta_T \text{ dB/km} \quad (1.2)$$

En el caso en el que las fluctuaciones son de densidad únicamente tenemos la ecuación (1.2) que permite calcular las pérdidas por efecto de Rayleigh, donde "K" es la constante de Boltzmann, T_f es la temperatura, β_T la compresibilidad isotérmica del material, "n" el índice de refracción y λ es la longitud de onda a la cual se está trabajando.

Como se puede observar en la ecuación (1.2) para evitar estas pérdidas es conveniente trabajar con una longitud de onda lo mayor posible puesto que existe una relación inversamente proporcional a la longitud de onda.

Considerando la contribución de atenuación UV (ultravioleta) e IR (infrarroja) la curva de atenuación resultante se puede observar en la siguiente figura 1.9 [10].

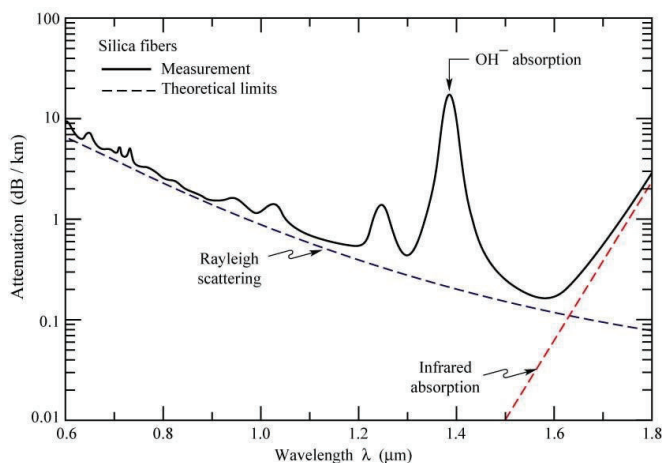


Figura 1. 9 Curva de atenuación en fibra de silicio considerando absorciones UV, IR y Rayleigh [10]

1.2.2.2.2 Scattering de Mie [12]

Este tipo de dispersión se produce en no uniformidades mayores a la longitud de onda de la radiación que se propaga a través de la fibra óptica.

Puede ser producto de pequeñas alteraciones a lo largo de la fibra, en la geometría o en la diferencia de los índices de refracción del núcleo y el manto, otras causas pueden ser pequeñas burbujas o tensiones mecánicas en el material que constituye el medio de transmisión. Afortunadamente la mayor parte de estas imperfecciones puede ser eliminadas con una correcta fabricación con los cuidados respectivos. En el caso de existir, su repercusión sobre la señal transmitida es mínima.

1.2.2.3 Atenuación por micro curvaturas [25]

Este tipo de atenuación es producido por imperfecciones microscópicas como resultado del proceso de fabricación, como por ejemplo cambios menores en el diámetro del núcleo, asimetría en la rotación. Normalmente estas imperfecciones son consideradas como un conjunto de radios de curvatura muy pequeños en el núcleo de la fibra. Estas imperfecciones también pueden ser causadas por estrés mecánico, tensión y/o torsión de la fibra.

Los radios de estas curvaturas normalmente son menores a 1 milímetro y comúnmente se las describe como una variable aleatoria con una distribución de espacio y amplitud [24] [25].

1.2.3 DISPERSIÓN CROMÁTICA [1]

A medida que un pulso se propaga a través de la fibra sufre deformaciones debido a que distintas componentes de la señal viajan a velocidades distintas, por ende llegando en diferentes tiempos al receptor, existen varios tipos de dispersión, de los cuales se analizará la dispersión cromática por ser la más significativa para el estudio de SPM (*Self-Phase Modulation*) y XPM (*Cross-Phase Modulation*).

1.2.3.1 Dispersión cromática de material [1]

El término de dispersión cromática es dado al fenómeno donde las diferentes componentes espectrales de una señal tienen diferentes velocidades. Este fenómeno aparece porque el índice de refracción del silicio es dependiente de la frecuencia, es decir diferentes componentes de frecuencia de la señal viajan a diferentes velocidades en el silicio; este componente de dispersión cromática es conocido como dispersión de material. La distribución de potencia entre el manto y el núcleo depende de la frecuencia, es decir a menor frecuencia mayor potencia se encontrará en el manto.

Se define un coeficiente de dispersión de material, medido típicamente en ps/Km.nm, para las fibras que trabajan en la primera ventana el valor típico de este coeficiente es de 80-100 ps/Km.nm, en las proximidades de la longitud de onda de 1300nm este coeficiente baja hasta valores de 4 o 5ps/Km.nm [31].

1.2.3.2 Dispersión cromática de guía de onda [1]

Únicamente una cantidad que se aproxima al 80% del total de energía se propaga a través del núcleo de la guía de onda, el resto lo hace a través del manto y debido a su menor índice de refracción esta señal viaja a una velocidad mayor, como

resultado aparece un nuevo tipo de dispersión denominado dispersión por guía de onda, incluso con ausencia de dispersión de material (es decir en el caso ideal donde el índice de refracción no es dependiente de la frecuencia), si la frecuencia cambia, la distribución de potencia cambia provocando que el índice efectivo o la constante de propagación del modo, cambie. Esta es la explicación física de la dispersión por guía de onda.

Se define un coeficiente de dispersión de guía onda cuya magnitud está dada en ps/km.nm, en las fibras monomodo de diseño normal este coeficiente tiene valores en el orden de 0.5ps/km.nm [1].

La dispersión cromática de guía de onda puede utilizarse para disminuir o contrarrestar la dispersión cromática de material, esto aproximadamente ocurre de manera natural a longitudes de onda de 1300 nm. El valor de longitud de onda para la cual esta dispersión es nula se denomina longitud de onda de dispersión cero, así fibras monomodo estándares tienen dispersión cero en 1300nm, en donde los efectos de dispersión de guía de onda y dispersión cromática de material se cancelan, también puede desplazarse este valor para producir un valor mínimo de dispersión en 1550 nm, esto da origen a las fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada.

El parámetro clave en la evolución de la forma del pulso es la segunda derivada de la constante de propagación¹ β , $\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$, este término es llamado dispersión de velocidad de grupo o GVD. La explicación de esta terminología es: dado $\beta_1 = \frac{d\beta}{d\omega}$ (es decir la primera derivada de la constante de propagación), $1/\beta_1$ representa la velocidad con la que un pulso se propaga en la fibra óptica y es llamado velocidad de grupo [14], β_2 es la tasa de cambio de la velocidad de grupo con la frecuencia, la dispersión cromática también es llamada dispersión de velocidad de grupo [20]. Si β_2 fuese igual a cero, esto significaría que la forma del pulso no se altera.

¹ Constante de Propagación β .- determina cómo la amplitud y la fase de un rayo de luz, con una frecuencia dada, varía a lo largo del eje de propagación [26].

En general β_2 no sólo es diferente de cero sino que también es función de la frecuencia. En la fibra óptica es conocida la longitud de onda de dispersión cero en la cual $\beta_2=0$, si $\beta_2>0$ es llamada dispersión normal, en el caso donde $\beta_2<0$ tenemos una dispersión anómala [1].

Las unidades de β_2 están dadas en ps^2/km , y sus valores varían según el tipo de fibra óptica.

1.3 EFECTOS NO LINEALES

En sistemas de comunicaciones ópticos donde se manejan potencias de transmisión pequeñas (en el orden de unos pocos mW) y velocidades de transmisión bajas (no mayores a 2.5Gbps) se pueden considerar como sistemas lineales. Sin embargo en sistemas donde se maneja potencias de transmisión mayores y altas velocidades de transmisión, el impacto de los efectos no lineales se vuelve considerable.

En este proyecto se estudiarán los efectos no lineales provocados por la dependencia del índice de refracción con la intensidad de campo asociado, esto es SPM y XPM. Para lo cual analizaremos los parámetros no lineales que influyen en estos fenómenos.

1.3.1 LONGITUD EFECTIVA Y ÁREA EFECTIVA [1] [12]

La interacción no lineal depende de la distancia de transmisión y el área transversal de la fibra, a mayor distancia de transmisión menor impacto de los efectos no lineales, es decir la señal es degradada por la atenuación a lo largo de la fibra óptica, esto quiere decir que los efectos no lineales ocurren temprano en la fibra óptica y van disminuyendo conforme la señal se propaga.

En la práctica hay un modelamiento sencillo en el cual se asume que la potencia es constante durante una distancia efectiva L_e , la cual ha demostrado ser suficiente en el entendimiento de los efectos no lineales. Siendo P_0 la potencia aplicada en la fibra y $P(z) = P_0 * e^{-\alpha z}$ la potencia en la distancia “z” a lo largo del enlace, con “ α ” la

atenuación de la fibra y “L” la distancia de la fibra, tenemos que la distancia efectiva L_e es [1]:

$$P_0 L_e = \int_{z=0}^L P(z) dz \quad (1.3)$$

Por efectos de la atenuación, se puede observar en la siguiente figura que la potencia disminuye a lo largo de la fibra óptica.

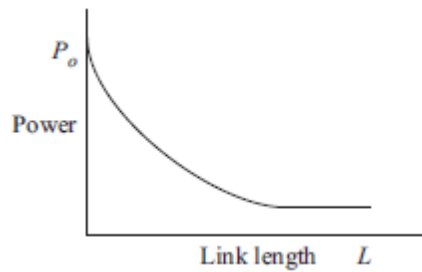


Figura 1. 10 Relación de potencia con distancia de enlace [1]

Resolviendo la integral de la ecuación 1.3 se obtiene la expresión para la longitud efectiva L_e [1]:

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (1.4)$$

Donde L_e es la distancia efectiva, α es el factor de pérdidas de la fibra. Nótese que $L_e < 1/\alpha$ y $L_e \rightarrow 1/\alpha$ para una gran longitud de fibra L.

Adicionalmente a la longitud efectiva se debe considerar el área efectiva. Para una potencia dada, la intensidad es inversamente proporcional al área del núcleo, y como la distribución de la potencia no es uniforme en la sección transversal, es conveniente considerar un área efectiva de sección transversal A_e , referida a un área real “A” con una distribución transversal para el modo fundamental $F(r, \Theta)$ [1].

$$A_e = \frac{\left[\int_r \int_\Theta |F(r, \Theta)|^2 r dr d\Theta \right]^2}{\int_r \int_\Theta |F(r, \Theta)|^4 r dr d\Theta} \quad (1.5)$$

Con r y Θ las coordenadas polares, esta ecuación indica que todos los efectos no lineales pueden ser expresados en términos del área efectiva para el primer modo fundamental de propagación en el tipo de fibra óptica dado. Por ejemplo la longitud efectiva puede ser expresada como $L_e = P/A_{eff}$, donde P es la potencia del pulso, esto para calcular el impacto de los efectos no lineales como SPM (*Self-Phase Modulation*), el cual se analizará más adelante.

1.3.2 LONGITUD NO LINEAL [1]

Este término ayuda a determinar la distancia a la cual los efectos no lineales se tornan importantes, la expresión que permite calcular esta longitud es [1]:

$$L_{NL} = \frac{\lambda A_e}{2\pi \bar{n} P_0} \quad (1.6)$$

Donde L_{NL} es la longitud no lineal, A_e es el área efectiva, P_0 es la potencia pico del pulso, \bar{n} es el coeficiente de refracción no lineal y λ es la longitud de onda. Si la distancia del enlace es comparable o mayor que la distancia no lineal, el efecto de no linealidades puede ser severo.

1.3.3 LONGITUD DE DISPERSIÓN [1]

Este término permite determinar la distancia a la cual los efectos de dispersión son significativos, la expresión que permite calcular esta longitud es la siguiente [1]:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (1.7)$$

Donde L_D es la longitud de dispersión, T_0 es el ancho de pulso y β_2 el coeficiente de dispersión de velocidad de grupo o GVD.

1.3.4 TIPOS DE PULSOS ÓPTICOS [20] [1]

Para realizar el estudio de los efectos no lineales es necesario determinar el tipo de pulso con el cual se trabajará. En esta sección describiremos los tipos de pulso más importantes.

1.3.4.1 Pulsos gaussianos [1] [20]

Un pulso gaussiano es aquel cuya envolvente es una función gaussiana. La expresión matemática para representar un pulso gaussiano considerando la variación de la frecuencia con el tiempo (denominado chirp), es la siguiente [1]:

$$U(0, t) = P_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \cos \left[\omega_0 t + \frac{C}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \quad (1.8)$$

En donde P_0 es la amplitud pico de la potencia del pulso, T_0 corresponde a la mitad del ancho del pulso de mayor intensidad óptica, "C" es el factor de chirp, el cual determina el grado de variación de la frecuencia del pulso, w_0 representa la frecuencia central del pulso transmitido.

1.3.4.2 Pulsos super gaussianos [1]

Los pulsos super gaussianos sirven cuando GVD (Dispersión de velocidad de grupo) gobierna la transmisión, es decir cuando la dispersión es un factor muy degradante. La expresión matemática que define un pulso de este tipo es la siguiente [1]:

$$U(0, t) = P_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^{2m} \right] \cos \left[\omega_0 t + \frac{C}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^{2m} \right] \quad (1.9)$$

El parámetro "m" determina la forma del pulso transmitido, en otras palabras, el pulso adquiere una forma más rectangular a medida que éste valor aumenta, o lo vuelve más fino cuando éste toma el valor de uno. En los pulsos gaussianos "m" es igual a uno, mientras para los pulsos súper gaussianos "m" es igual a tres.

En la siguiente figura se muestran dos pulsos uno con $m=1$ (Gaussiano) y otro con $m=3$ (Super Gaussiano) respectivamente:

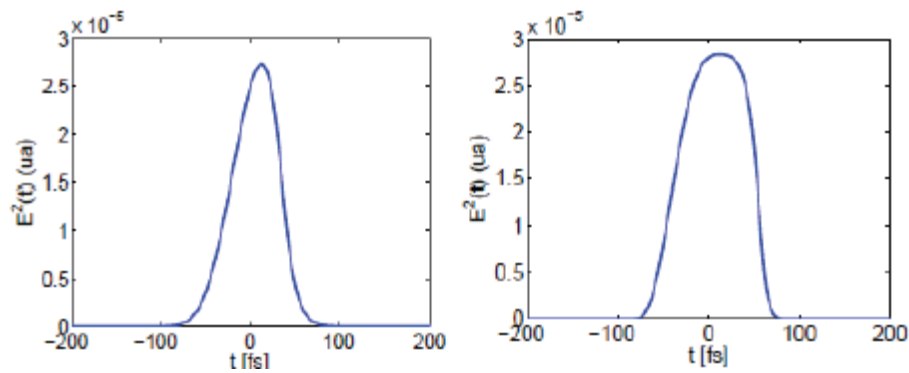


Figura 1. 11 Forma de pulso $m=1$ y $m=3$ [1]

1.3.4.3 Pulsos secantes [18]

Este tipo de pulsos se los utiliza cuando la transmisión requiere solitones ópticos (pulsos solitarios que viajan a través de la fibra óptica sin cambiar su forma).

Al realizar el estudio de los efectos no lineales los solitones son la respuesta más estable y esto se lo puede obtener transmitiendo por el canal pulsos ópticos secantes hiperbólicos los cuales se propagan sin distorsión, es decir sin cambio de forma para cualquier distancia de propagación.

En este estudio se utilizarán los pulsos Gaussianos por tres motivos:

- a) La transformada de Fourier de un pulso Gaussiano es otro pulso Gaussiano, es decir existe una facilidad matemática.
- b) Los pulsos emitidos por láseres fabricados con materiales semiconductores, adquieren un cierto chirp cuando se modulan directamente.
- c) La dispersión y algunos efectos no lineales pueden provocar que pulsos que no tenían chirp inicialmente lo adquieran al propagarse por la fibra.

1.3.5 SELF-PHASE MODULATION (SPM) [1] [12] [22] [20] [19]

Este fenómeno es el producto de un excesivo nivel de potencia. Cuando el haz tiene demasiada potencia causa un pequeño incremento en el índice de refracción de la

fibra óptica, esto puede provocar que la parte de la señal que posee una mayor potencia se vea retardada con respecto a la de baja potencia, por consiguiente el pulso experimentará un ensanchamiento.

Es importante notar que debido a la atenuación a lo largo del medio de transmisión y tomando en cuenta que los fenómenos no lineales dependen de la potencia de transmisión, eventualmente el impacto de los fenómenos no lineales serán muy pequeños comparados con los efectos lineales.

Este efecto ocasiona que el pulso transmitido sufra un chirp de frecuencia, pues el mismo se auto modula en fase, este chirp afecta el pulso, como resultado aumenta los efectos de dispersión cromática y es importante considerarlo para sistemas de altas tasas de transmisión, que ya de por si tienen limitaciones por dispersión cromática significantes.

Para analizar este efecto se considerará un único canal donde el campo eléctrico aplicado tiene la siguiente forma [1]:

$$E(z, t) = E \cos(\omega_0 t - \beta_0 z) \quad (1.10)$$

Donde E es una constante y corresponde a la amplitud del campo eléctrico, ω_0 es la frecuencia central del pulso, “z” es la dirección de propagación y β_0 es la constante de propagación.

En presencia de las no linealidades necesitamos encontrar cómo este campo evoluciona a lo largo de la fibra, para ello debemos encontrar la constante de propagación β_0 , la cual viene dada por la siguiente expresión [1]:

$$\beta_0 = \frac{\omega_0}{c} \left(n + \frac{3}{8n} X^3 E^2 \right) \quad (1.11)$$

Donde “n” es el índice de refracción del material, X^3 es llamada susceptibilidad no lineal de tercer orden y se la asume como constante [1].

En la ecuación 1.10 se puede observar que el campo eléctrico tiene la forma de una senoide cuya fase va cambiando, este fenómeno es conocido como Self-Phase

Modulation. La intensidad del campo eléctrico, I , correspondiente al plano de onda con una amplitud E es [1]:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c n |E^2| \quad (1.12)$$

Donde ϵ_0 es el coeficiente de permisividad en el vacío. Esto quiere decir que la fase cambia debido a que SPM es proporcional a la intensidad del campo eléctrico.

La fase se incrementa conforme la distancia de propagación z aumenta. Como la relación entre β y el índice de refracción 'n' en el régimen lineal es $\beta = \omega n/c$ [1], se puede interpretar la ecuación de β_0 especificando un índice de refracción dependiente de la intensidad de la siguiente manera [19]:

$$\hat{n}(E) = n + \bar{n}I \quad (1.13)$$

Con

$$\bar{n} = \frac{2}{\epsilon_0 c n} \frac{3}{8n} X^{(3)} \quad (1.14)$$

Donde ϵ_0 corresponde a la permisividad en el vacío, "c" es la velocidad de la luz en el vacío, y $X^{(3)}$ es la susceptibilidad de tercer orden cuyo valor es $6 \times 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{erg}$. Este último término, \bar{n} , es llamado coeficiente de refracción no lineal y varia en el rango de $2.2 - 3.4 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2/\text{W}$ en la fibra de silicio [1].

Los pulsos en comunicaciones ópticas tienen un ancho finito en tiempo y no son monocromáticos, además no son ondas planas, es decir tienen una componente transversal (x,y) de la distribución del campo eléctrico que no es constante pero está regida por la geometría de la fibra, sin embargo el mismo efecto cualitativo de SPM se mantiene para los pulsos.

Debido a la extensión temporal finita del pulso, los pulsos no tienen una intensidad de campo eléctrico constante. La fase sufre cambios en diferentes partes del pulso, nótese que el signo del cambio es negativo debido al signo menos en la expresión para la fase ($W_0 t - \beta_0 z$) en la ecuación 1.10.

El pico del pulso sufre el máximo cambio de fase (en valor absoluto), y los bordes frontal y posterior del pulso sufren cambios en fase cada vez más pequeños, debido a que la frecuencia es la derivada de la fase, entonces tenemos que los bordes posteriores del pulso son sometidos a un cambio de frecuencia negativo y los bordes frontales a un cambio de frecuencia positivo, esto implica que el factor del chirp “K” es positivo, en otras palabras SPM causa un chirp positivo en los pulsos.

Los efectos de SPM se vuelven importantes a altas potencias de transmisión (debido a que el término E^2 se vuelve más grande).

Como el chirp inducido por SPM cambia los efectos de la dispersión cromática a un mismo nivel de potencia, es importante considerar estos efectos en pulsos cortos, es decir a altas tasas de transmisión, donde los pulsos ya son afectados por la dispersión cromática. Cuando los efectos de SPM y la dispersión cromática son casi iguales, predominando la dispersión cromática, SPM puede reducir el ensanchamiento del pulso producido por el efecto de dispersión cromática. Cuando los efectos de SPM y la dispersión cromática son iguales el pulso se mantiene estable y no se ensanchará después, luego de haber sido ensanchado un poco al inicio.

Cuando la dispersión cromática es despreciable, es decir alrededor de la longitud de onda de dispersión nula, SPM conduce a una modulación en amplitud del pulso.

1.3.5.1 Chirp inducido por SPM en pulsos Gaussianos [1] [12]

Considerando un pulso sin chirp con una envolvente gaussiana [1] [20]:

$$U(0, \tau) = e^{-\tau^2/2} \quad (1.15)$$

Donde τ es el tiempo, asumimos una envolvente normalizada con un pico de amplitud uno.

En presencia de SPM únicamente (sin tomar en cuenta la dispersión cromática), el pulso adquiere un chirp que depende de la distancia. En la figura 1.12 se puede ver

un pulso sin chirp y el mismo pulso afectado por un chirp inducido por SPM al haber sido propagado una distancia $L = 5L_{NL}$.

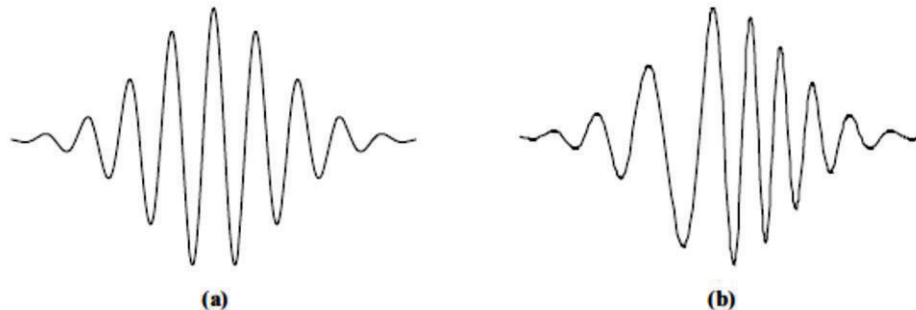


Figura 1. 12 a) Pulso sin chirp. b) Pulso con chirp inducido por SPM [12]

La frecuencia instantánea del pulso se la calcula con la siguiente expresión [12]:

$$w(\tau) = w_0 + \frac{2L}{L_{NL}}\tau e^{-\tau^2} \quad (1.16)$$

Donde w_0 es la frecuencia central del pulso, L_{NL} es la longitud no lineal y τ es el tiempo en nuestro sistema de referencia.

Y el factor de chirp de este pulso [12]:

$$k_{SPM}(\tau) = \frac{2}{L_{NL}}e^{-\tau^2}(1 - 2\tau^2) \quad (1.17)$$

En la figura 1.13 se puede observar el cambio de fase inducido por SPM, el cambio entre $w - w_0$ en la frecuencia instantánea desde la frecuencia central, y el factor de chirp para $L=L_{NL}$, en este caso los efectos no lineales no pueden ser despreciados.

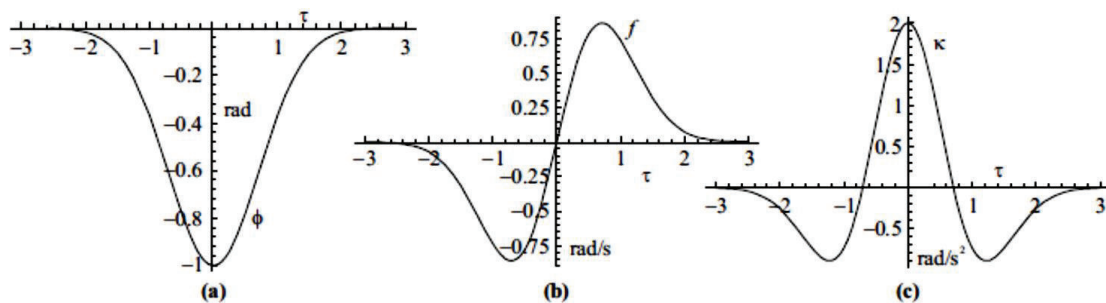


Figura 1. 13 a) Fase, b) Frecuencia instantánea, c) Pulso gaussiano luego de haberse propagado una distancia $L=L_{NL}$ [1]

El chirp inducido por SPM es positivo alrededor del centro del pulso y es significativo cuando L es comparable con L_{NL} , en el caso que $L = L_{NL}$ el valor del factor de chirp en el pulso central es igual a 2 [1]. El chirp que aparece se incrementa linealmente con la distancia, sin embargo esto solo es verdad al considerar que no existe atenuación de ningún tipo en la fibra. La ecuación para la distancia que se utiliza considerando estas pérdidas es la (1.4) es decir se reemplaza L por L_e .

A una longitud de onda de 1550nm, las pérdidas en una fibra son típicamente de $\alpha = 0.22$ dB/Km y $\frac{1}{\alpha} \approx 20$ km independientemente de la distancia L , SPM solo es significativo si la longitud no lineal (L_{NL}) es comparable con 20km (para este caso) [1]. Sin embargo con un valor de longitud no lineal de $L_{NL} = 384$ Km y una potencia transmitida de 1mW los efectos de SPM pueden ser ignorados a este nivel de potencia. Si se aumenta la potencia a 10 mW, el valor de $L_{NL} = 38$ km, como la distancia del enlace ya es comparable con la distancia no lineal los efectos de SPM no pueden ser ignorados [1].

1.3.5.2 Dispersión de velocidad de grupo (GVD) relacionado con SPM [11]

La ecuación NLSE (*Nonlinear Schrödinger Equation*) es esencial en la propagación de los pulsos, en el caso de pulsos con un ancho mayor a 5ps (puesto que para pulsos con anchos menores es necesario incluir efectos no lineales de orden mayor) su utilizará la siguiente ecuación [11]:

$$i \frac{dA}{dz} = -\frac{d\alpha}{dt} A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{d^2 A}{dt^2} - i\gamma |A|^2 A \quad (1.18)$$

Donde A es la variación de la envolvente del pulso, “ t ” es la referencia temporal en la que se está moviendo el pulso, γ representa el coeficiente de propagación no lineal, α es la constante de atenuación y β_2 el coeficiente de dispersión de velocidad de grupo. Los tres términos del lado derecho de la ecuación corresponden respectivamente a los efectos de pérdidas, dispersión y no linealidades.

Introduciendo los términos de L_{NL} y la longitud a la cual los efectos de dispersión se tornan importantes “ L_D ” (Longitud de Dispersión), en una escala normalizada de tiempo se obtienen las siguientes ecuaciones [12]:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad y \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (1.19)$$

Donde γ representa el coeficiente de propagación no lineal, T_0 es el ancho del pulso en pico segundo, P_0 es la potencia inicial del pulso, estas ecuaciones las analizaremos más a detalle en el siguiente capítulo. Cuando el tamaño de la fibra es menor a L_{NL} y aproximadamente igual a L_D la evolución del pulso es gobernada por GVD, y los efectos no lineales juegan un rol relativamente pequeño. El efecto predominante es la dispersión cuando la longitud de dispersión es mucho menor a la longitud no lineal, esto es [12]:

$$\frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \ll 1 \quad (1.20)$$

En el caso que la longitud de la fibra “L” sea menor a L_D y aproximadamente igual a L_{NL} el efecto dominante será SPM, en otras palabras el efecto no lineal será predominante cuando la longitud de dispersión sea mucho mayor a la longitud no lineal. Esta condición satisface a pulsos relativamente anchos como por ejemplo con T_0 mayor a 100ps. SPM puede liderar en la forma del pulso en la presencia de un GVD débil.

Cuando la longitud de la fibra “L” es más grande que L_{NL} y L_D , los efectos de SPM y GVD actúan conjuntamente en la propagación del pulso. El efecto conjunto de GVD y SPM es cualitativamente diferente comparado al caso en el que estos actuaran solos. En el régimen de dispersión anómala (β_2 menor a cero) la fibra puede soportar solitones.

En el caso del régimen de dispersión normal, GVD y SPM pueden ser utilizados para una compresión inicial del pulso, lo cual mitigaría el ensanchamiento del mismo [20].

1.3.5.3 Análisis espectral del impacto de SPM [1]

Para realizar el análisis espectral de los resultados debemos incluir un nuevo parámetro llamado cambio de fase máximo (φ_{max}) y viene dado por [14]:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \quad (1.21)$$

El ensanchamiento espectral es consecuencia de la dependencia del tiempo de este factor, esto se puede entender notando que las variaciones temporales de fase implican que la frecuencia óptica instantánea difiere de la frecuencia central del pulso en ω_0 , esta diferencia está dada por la siguiente expresión [14]:

$$\delta\omega_{max} = 0.86 * T_0^{-1} \varphi_{max} \quad (1.22)$$

En la figura 1.14 se observan algunos ejemplos de este valor en un pulso gaussiano:

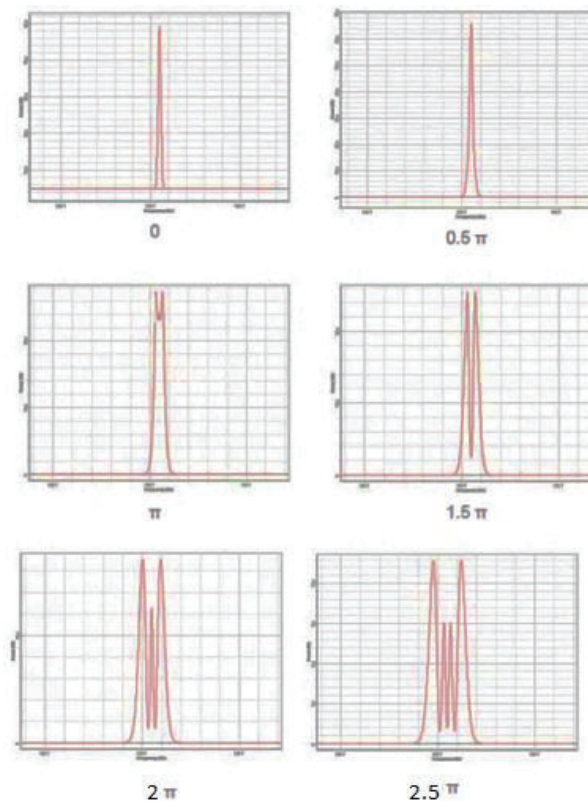


Figura 1. 14 Gráficos del cambio de la forma del espectro en función del parámetro $\varphi_{m\acute{a}x}$ [13]

Se puede observar que este parámetro está directamente relacionado con la longitud efectiva, por tanto es directamente proporcional a la potencia de la señal. En las simulaciones se podrá observar cómo en efecto cambia la forma del pulso al aumentar el valor de este parámetro ($\varphi_{m\acute{a}x}$) y, por tanto, cómo modifica la forma de los pulsos analizados.

El valor de estos dos nuevos parámetros está incluido en el programa de Matlab implementado cuyos resultados están mostrados en el anexo A.

1.3.5.4 SPM en sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [1]

Como se ha observado las fluctuaciones en la potencia de la señal causan cambios en la fase de la misma, esto induce a un chirp adicional, lo que resulta en una dispersión cromática mayor.

En la práctica SPM toma importancia al diseñar sistemas que operan a velocidades superiores a 10Gbps limitando la potencia a unos pocos mili vatios. Numéricamente el chirp inducido por SPM y la dispersión puede ser estudiado resolviendo la siguiente ecuación [1].

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{1 + \sqrt{2} \frac{Le}{L_{NL}} * \frac{L}{L_D} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} * \frac{L_e^2}{L_{NL}^2}\right) \frac{L^2}{L_D^2}} \quad (1.23)$$

Para simplificar el estudio se ha considerado la expresión aproximada para el ancho T_L de un pulso gaussiano inicialmente sin chirp luego que se ha propagado una distancia L.

En sistemas de 10Gbps o superiores trabajando en la ventana 1.55um, $\beta_2 < 0$, el SPM inducido es positivo para cualquier distancia. Debido a que SPM es dependiente de la potencia de transmisión, el grado de compresión inicial y la tasa de ensanchamiento posterior aumenten con la potencia, en la figura 1.5 se observa la representación gráfica de la ecuación (1.23) y muestra la evolución del ancho del pulso en función de la distancia del enlace tomando en cuenta el chirp inducido por SPM, para esta figura se han considerado 3 señales con potencias, de 1mW, 10mW

y 20mW, y un ancho de pulso 50 ps que es la mitad de un periodo de bit, se hace esta consideración debido a que los puntos de media potencia (que corresponden al ancho del pulso gaussiano) corresponden a la mitad del tiempo de bit.

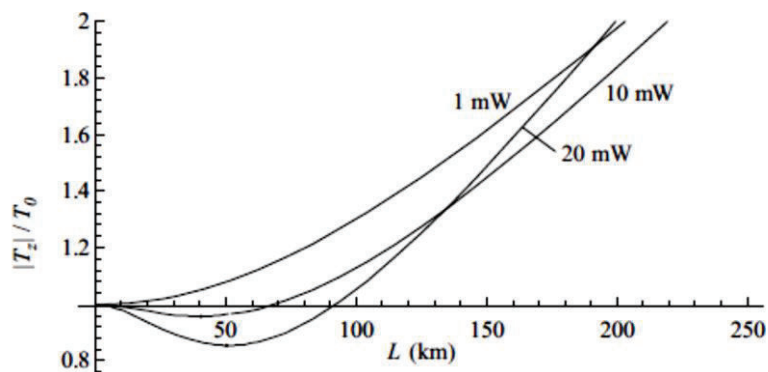


Figura 1. 15 Ensanchamiento del pulso en función de la distancia y del parámetro β_2 [1]

Se puede observar que la señal cuya potencia es de 20mW tiene una compresión inicial mayor, sin embargo sufre un ensanchamiento más rápido que las otras señales (la pendiente de su curva aumenta) [1]. La potencia de transmisión ideal depende de la distancia del enlace y de la cantidad de dispersión presente, posteriormente se realizarán simulaciones para comprobar la veracidad de estos enunciados. Para fibras monomodo que trabajan en la ventana de $1.55\mu\text{m}$, la potencia de transmisión está limitada al rango de 2 a 10 mW para enlaces en el orden de 100 km. Es posible aumentar la potencia para mejorar la relación señal a ruido a costa de aumentar los efectos de SPM y dispersión [1].

Las limitaciones del sistema pueden ser calculados con la ecuación 1.23, como por ejemplo la distancia máxima de transmisión sin sufrir distorsión de los pulsos. En los sistemas WDM estos efectos se vuelven importantes incluso a pequeñas potencias de transmisión, cuando se usan fibras de dispersión desplazada entonces la dispersión inducida y los efectos de *walk-off*² se reducen.

² Walk-off.- es la pérdida del solapamiento temporal de los pulsos, como los pulsos de las diferentes componentes de frecuencia tienen diferente velocidad de grupo, al propagarse una cierta distancia pierden el solapamiento, esto puede producir un cambio en la forma de los pulsos [16].

1.3.6 MODULACIÓN CRUZADA DE FASE (XPM, CROSS PHASE MODULATION)

El efecto SPM puede provocar que alguna otra señal que viaja en la misma fibra cambie su fase, esto da origen a la modulación cruzada de fase (XPM, Cross-Phase Modulation). Este fenómeno toma mucha relevancia en los sistemas WDM, debido a que el índice de refracción no es lineal y los diferentes canales interactúan entre sí, entendiéndose que cada canal corresponde a una portadora óptica con una longitud de onda diferente. Este efecto conduce a la distorsión de los pulsos transmitidos y es un factor limitante en los sistemas de alta capacidad. En los sistemas WDM, la dependencia de la intensidad óptica de la señal y los efectos no lineales aumenta debido a que las señales combinadas pueden tener una intensidad mayor, incluso cuando los diferentes canales trabajan a potencias moderadas. Como consecuencia el chirp inducido solamente por SPM se incrementa debido a la intensidad de las señales de los otros canales. Para analizar este fenómeno es suficiente considerar un sistema WDM con dos canales de la siguiente forma [1]:

$$E(\mathbf{r}, t) = E_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cos(\omega_2 t - \beta_2 z) \quad (1.24)$$

Donde E_1 y E_2 corresponden a la intensidad de campo eléctrico de dichos pulsos, z es el eje de propagación y β_1, β_2 son los coeficientes de propagación. Utilizando la ecuación de polarización dieléctrica en 1.24 tenemos [1]:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{NL}(\mathbf{r}, t) &= \epsilon_0 \chi^{(3)} (E_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + E_2 \cos(\omega_2 t - \beta_2 z))^3 \\ &= \epsilon_0 \chi^{(3)} \left[\left(\frac{3E_1^3}{4} + \frac{3E_2^2 E_1}{2} \right) \cos(\omega_1 t - \beta_1 z) + \left(\frac{3E_2^3}{4} + \frac{3E_1^2 E_2}{2} \right) \cos(\omega_2 t - \beta_2 z) \right. \\ &\quad + \frac{3E_1^2 E_2}{4} \cos((2\omega_1 - \omega_2)t - (2\beta_1 - \beta_2)z) \\ &\quad + \frac{3E_2^2 E_1}{4} \cos((2\omega_2 - \omega_1)t - (2\beta_2 - \beta_1)z) \\ &\quad + \frac{3E_1^2 E_2}{4} \cos((2\omega_1 + \omega_2)t - (2\beta_1 + \beta_2)z) \\ &\quad + \frac{3E_2^2 E_1}{4} \cos((2\omega_2 + \omega_1)t - (2\beta_2 + \beta_1)z) \\ &\quad \left. + \frac{E_1^3}{4} \cos(3\omega_1 t - 3\beta_1 z) + \frac{E_2^3}{4} \cos(3\omega_2 t - 3\beta_2 z) \right] \end{aligned} \quad (1.25)$$

El componente de la polarización dieléctrica a la frecuencia w_1 es [1]:

$$\frac{3}{4}\epsilon_0 X^{(3)}(E_1^2 + 2E_2^2) E_1 \cos(w_1 t - \beta_{1z}) \quad (1.26)$$

Con $X^{(3)}$ la susceptibilidad de tercer orden cuyo valor es constante [1], y ϵ_0 la permisividad del vacío. Se puede observar que el campo tiene una componente sinusoidal que varía en proporción a $E_1^2 + 2E_2^2$. El primer término se debe al efecto de SPM, el segundo término es consecuencia de XPM. En el caso en que $E_1 = E_2$, es decir el caso en el que los dos campos tienen la misma intensidad, se observa que el efecto de XPM es dos veces peor que el de SPM.

El efecto de XPM es cualitativamente similar a SPM, por eso se espera que el chirp y por consiguiente la dispersión de pulsos por SPM en sistemas WDM sea agravado.

En la práctica los sistemas que trabajan con una fibra monomodo pueden disminuir el impacto de los efectos de XPM incrementando el espaciamiento de las longitudes de onda entre canales.

1.3.6.1 Ecuación NLSE (*Nonlinear Schrödinger Equation*) [12] [13]

Asumiendo que los efectos no lineales no afectan de manera significativa a los modos de la fibra, la ecuación correspondiente a la intensidad de campo eléctrico $E_j(r,t)$ puede escribirse de la siguiente manera [12]:

$$E_j(r, t) = F_j(x, y)A_j(z, t)\exp(i\beta_{0j}z) \quad (1.27)$$

Donde $F_j(x, y)$ es la distribución transversal de la fibra para los modos J_{th} , esto es en $j= 1, 2$, etc. $A_j(z,t)$ es el efecto de la atenuación (disminución de la amplitud) y B_{0j} es la constante de propagación a la frecuencia W_j . Los efectos dispersivos están incluidos si se expande la constante de propagación $B_j(w)$ para cada onda (en este caso estamos considerando 2 ondas para efectos de estudio). La ecuación de propagación resultante $A_j(z,t)$ es la siguiente [12]:

$$\frac{dA_j}{dz} + \beta_{1j} \frac{dA_j}{dt} + \frac{i\beta_{2j}d^2A_j}{2dt^2} + \frac{\alpha_j}{2} A_j = in_2 \left(\frac{w_j}{c}\right) (f_{jk}|A_1|^2 + 2f_{jk}|A_2|^2) \quad (1.28)$$

Donde $k \neq j$, $B_{1j} = 1/V_{gj}$, V_g es la velocidad de grupo, β_2 es el coeficiente GVD y α es el coeficiente de pérdidas. Donde el término f_{jk} es el siguiente [12]:

$$f_{jk} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} |F_j(x,y)|^2 |F_k(x,y)|^2 dx dy}{(\iint_{-\infty}^{\infty} |F_j(x,y)|^2 dx dy)(\iint_{-\infty}^{\infty} |F_k(x,y)|^2 dx dy)} \quad (1.29)$$

Donde $F_j(x,y)$ es la dispersión modal, se puede observar que esta ecuación NLSE tiene la misma forma que la ecuación NLSE para SPM, la diferencia radica que ahora se incluyen los efectos de un segundo pulso en este caso. Para poder interpretar la ecuación 1.28, puede ser escrita como el conjunto de dos ecuaciones NLSE acopladas [12] cada ecuación $A_j(z,t)$ gobierna la propagación de cada pulso:

$$\frac{dA_1}{dz} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{dA_1}{dt} + \frac{i\beta_{21}d^2A_1}{2dt^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1 = i\gamma_1(|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1 \quad (1.30)$$

$$\frac{dA_2}{dz} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{dA_2}{dt} + \frac{i\beta_{22}d^2A_2}{2dt^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2 = i\gamma_2(|A_2|^2 + 2|A_1|^2)A_2 \quad (1.31)$$

El parámetro no lineal γ_j está definido de la siguiente forma [12]:

$$\gamma_j = \frac{n_2 w_j}{c A_{eff}} \quad y \quad j=1,2 \quad (1.32)$$

Donde A_{eff} es el área efectiva del núcleo, típicamente $50\mu m^2$ para fibras SSMF (*Standard Single Mode Fiber*), sin embargo los valores de este parámetro están estandarizados por la ITU para cada tipo de fibra. w_j es la frecuencia central del pulso, "c" es la velocidad de la luz en el vacío y n_2 es el índice de refracción no lineal que toma valores entre $2.2 \cdot 10^{-20}$ y $3.4 \cdot 10^{-20} \frac{m^2}{W}$, el término γ_j representa el coeficiente de propagación no lineal, este parámetro se utiliza tanto para SPM como para XPM, en este caso se puede observar que el coeficiente de propagación no lineal es particular para cada señal, en el siguiente capítulo se ampliarán los conceptos de estos términos para los cálculos correspondientes.

1.3.6.2 Efectos temporales y de espectro de XPM [12][13]

Como resultado de XPM ocurren cambios tanto en el espectro como en el tiempo, entre los dos pulsos que se propagan. Las ecuaciones 1.30 y 1.31 gobiernan la evolución de los pulsos a lo largo de la fibra, incluyen los efectos de velocidad de grupo, SPM y XPM sin tomar en cuenta las pérdidas en la fibra las ecuaciones para dichos pulsos son las siguientes [12]:

$$\frac{dA_1}{dz} + \frac{i\beta_{21}d^2A_1}{2dT^2} = i\gamma_1(|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1 \quad (1.33)$$

$$\frac{dA_2}{dz} + d\frac{dA_2}{dT} + \frac{i\beta_{22}d^2A_2}{2dT^2} = i\gamma_2(|A_2|^2 + 2|A_1|^2)A_2 \quad (1.34)$$

Con [12]:

$$d = \frac{v_{g1} - v_{g2}}{v_{g1}v_{g2}} \quad \text{y} \quad T = t - \frac{z}{v_{g1}}$$

El tiempo T es medido en un sistema de referencia en el cual un pulso tiene velocidad V_g , el parámetro “d” es la diferencia de velocidades entre los dos pulsos.

Usando un ancho de T_0 para el primer pulso a una cierta longitud de onda, introducimos la distancia de walk-off L_w [12]:

$$L_w = \frac{T_0}{|d|} \quad (1.35)$$

Los pulsos pueden evolucionar de manera diferente dependiendo de las magnitudes de L, L_w y L_D , si la longitud de la fibra L es muy pequeña comparada con L_w y L_D los efectos de dispersión no tienen mayor impacto, y pueden ser despreciados, esto puede ocurrir en anchos de pulso iniciales mayores a 1ns y distancias menores a 10m. Por otro lado si L_w es menor a L y L_D es mayor a L, inclusive si la forma del pulso no varía, la combinación de GVD y el chirp inducido por las no linealidades pueden afectar el espectro drásticamente [12].

Generalmente este caso se da para anchos de pulso iniciales de 100ps a una distancia de 10m y una dispersión menor a 10ps/m. Por último para pulsos muy

pequeños es decir con anchos de pulso iniciales menores a 10ps los efectos de GVD deben incluir XPM que afecta tanto al espectro como a la forma del pulso.

El software utilizado en el presente documento usa estas ecuaciones para calcular el fenómeno de XPM.

1.4.4.2.1 Ensanchamiento asimétrico espectral [14]

Considerando el caso más simple donde la longitud de la fibra es mucho menor que la longitud de dispersión, las variaciones de la velocidad de grupo son incluidas en el parámetro “d” asumiendo un L_W menor a L, las soluciones de las ecuaciones 1.33 y 1.34 son las siguientes para el caso general donde $z=L$ [14]:

$$A_1(L, T) = A_1(0, T)e^{i\Phi_1} \quad A_2(L, T) = A_2(0, T)e^{i\Phi_2} \quad (1.36)$$

De estas ecuaciones resultantes se puede obtener la dependencia no lineal de los cambios de fase, así:

$$\Phi_1(T) = \gamma_1(L|A_1(0, T)|^2 + 2 \int_0^L |A_2(o, T - zd)|^2 dt \quad (1.37)$$

$$\Phi_2(T) = \gamma_2(L|A_2(0, T)|^2 + 2 \int_0^L |A_1(o, T - zd)|^2 dt \quad (1.38)$$

Donde Φ es el cambio de fase no lineal para $j=1,2$ en este caso. Estas ecuaciones indican que mientras el pulso se va propagando a través de la fibra, es modulado en fase debido a la dependencia del índice de refracción de la intensidad, esta característica se encuentra en el parámetro γ cuya ecuación es la (1.32).

La modulación en fase tiene dos contribuciones: el primer término es debido a SPM y el segundo término es por XPM. Para hallar la contribución de XPM se debe integrar a lo largo de toda la fibra.

En el siguiente gráfico se puede observar la contribución de XPM en dos pulsos gaussianos cuyas potencias son diferentes:

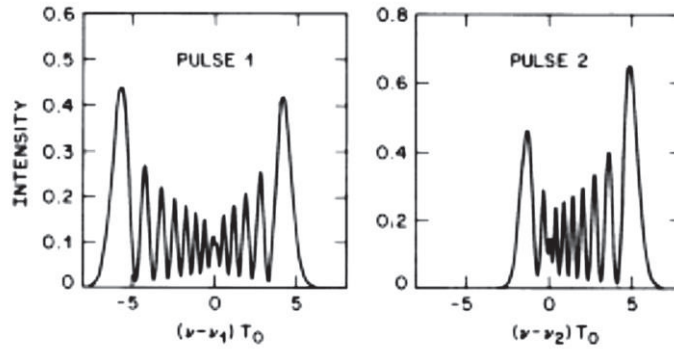


Figura 1. 16 Espectro de dos pulsos que se propagan en una fibra óptica exhibiendo ensanchamiento espectral asimétrico inducido por XPM [13]

Como se ha observado, la dependencia de la fase con el tiempo se manifiesta como ensanchamiento espectral, es similar a SPM, se espera que el espectro de cada pulso se ensanche y desarrolle una estructura con múltiples picos.

Sin embargo en este caso se han combinado la contribución de SPM y XPM en la fase del pulso. En la figura 1.16 se muestra el espectro de dos pulsos, cuyos parámetros han sido obtenidos de una situación experimental, donde el primer pulso de 630 nm con una potencia de 50W es lanzado conjuntamente con otro pulso de 530nm y 100W de potencia. $T_0 = 10\text{ps}$ y $L = 5\text{m}$, la figura 1.16 muestra una asimetría espectral debido a XPM. Puede notarse que la asimetría en el pulso dos es mayor a la del pulso uno porque este pulso tiene una mayor potencia $P_1 = 2P_2$ [13]. Para entender este fenómeno de forma cualitativa, se utilizará la siguiente expresión para el chirp para el primer pulso [12]:

$$\Delta v_1(\tau) \approx \frac{\gamma_1 L}{\pi T_0} e^{-t^2} [P_1 \tau + P_2 (2\tau - \delta)] \quad (1.39)$$

Y para el segundo pulso se tendrá [12]:

$$\Delta v_2(\tau) \approx \frac{\gamma_2 L}{\pi T_0} e^{-t^2} [P_2 \tau + P_1 (2\tau + \delta)] \quad (1.40)$$

Siendo $\delta = dL/T_0$, $\tau = T/T_0$ y P la potencia respectiva para cada pulso [13]. Para valores positivos de δ , el valor del chirp es mayor para el borde delantero del primer

pulso, lo contrario ocurre en el segundo pulso, esto se debe a que una parte del pulso se ensancha hacia longitudes de onda superiores y otra hacia longitudes de onda inferiores, respectivamente, el espectro del primero pulso es desplazado hacia longitudes de onda inferiores, mientras que el espectro del segundo pulso es desplazado hacia longitudes de onda superiores.

La siguiente figura muestra el espectro óptico (columna izquierda), el XPM inducido y chirp (columna derecha) para un pulso de prueba que se propaga junto a un pulso de bombeo que se mueve con una velocidad mayor es decir $\delta < 0$ y tiene un retardo inicial τ_d . El pulso de prueba está mostrado con una línea discontinua.

Es necesario aclarar que los pulsos de bombeo se los utiliza únicamente para estudiar el efecto de XPM, puesto que en la práctica XPM se manifiesta como consecuencia de la presencia de diferentes canales que se propagan en la fibra óptica, siendo la separación entre longitudes de onda el parámetro que determinará la magnitud del impacto de este fenómeno no lineal.

En la columna derecha de la figura 1.17 se puede observar que el espectro de prueba se ensancha a longitudes de onda superiores en $\tau_d = 0$, en $\tau_d = 2$ se vuelve simétrico, y en $\tau_d = 4$ se vuelve asimétrico escachándose hacia longitudes de onda inferiores. El espectro de $\tau_d = 0$ y $\tau_d = 4$ son espejos mutuamente a una frecuencia central dada.

La explicación física de este fenómeno se lo puede entender considerando el chirp inducido por XPM, esto se muestra en la columna derecha, para $\tau_d = 0$ el chirp es positivo a través de todo el pulso de prueba, donde el chirp máximo ocurre en el centro del pulso. En comparación con SPM donde el chirp es positivo en el borde frontal del pulso, cero en la mitad del pulso y negativo en la parte posterior del pulso. La diferencia entre SPM y XPM se debe a la velocidad de grupo, en $\tau_d = 0$ el pulso de prueba que se mueve lento, interactúa principalmente con la parte posterior del pulso de bombeo, dando como resultado un desplazamiento del espectro hacia longitudes de onda inferiores y el chirp inducido por XPM es positivo.

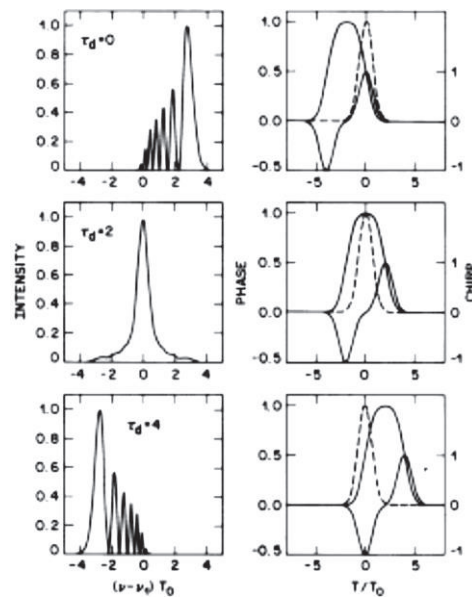


Figura 1. 17 Espectro y fase inducido por XPM, columna izquierda y derecha respectivamente [12]

En $\tau_d = 4$ el pulso de bombeo alcanza al pulso de prueba en la salida de la fibra, sus bordes frontales interactúan con el pulso de prueba, en este caso el chirp es negativo y el espectro es desplazado hacia el longitudes de onda mayores.

En el caso de $\tau_d = 2$ el pulso de bombeo no solo alcanza al pulso de prueba sino que lo atraviesa de forma simétrica, el chirp es 0 igual que en el caso de SPM, sin embargo la magnitud es menor a lo largo de todo el pulso. El espectro del pulso de prueba depende fuertemente de los valores de la relación L/L_W , si este valor es 2 con $\tau_d = 1$ el ensanchamiento del pulso será mayor en contraste si L fuese menor que L_W el espectro sería virtualmente inalterado.

1.3.6.3 Cambios temporales en el espectro debido a XPM [1] [12]

En este caso analizaremos si L_D es comparable con L o con L_W , los efectos combinados de SPM, XPM y GVD pueden ocasionar cambios temporales que son acompañados por cambios espectrales.

Para realizar este análisis se va a despreñar las pérdidas en la fibra por simplicidad. Para aislar el efecto de XPM es útil considerar una configuración con un pulso de

bombeo y un pulso de prueba. La evolución del pulso de bombeo no es afectada por el pulso de prueba, por otra parte el pulso de prueba es afectado por el pulso de bombeo debido a XPM [19].

La figura 1.18 muestra la forma y el espectro de los pulsos de bombeo y de prueba, los dos son pulsos gaussianos del mismo ancho sin retardo inicial entre ellos, en esta figura se puede apreciar que el pulso de prueba desarrolla oscilaciones cerca del borde posterior mientras que el borde frontal esta inalterado esto es resultado de la contribución de XPM y GVD.

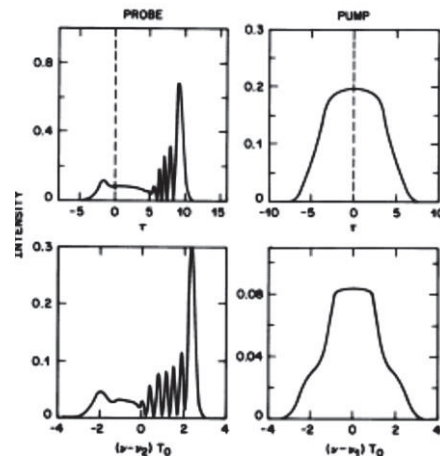


Figura 1. 18 Forma (fila superior) y espectro (fila inferior) de los pulsos de prueba y bombeo, la línea punteada indica el lugar de los pulsos de entrada [12]

Se asume que el pulso de bombeo viaja más rápido que el pulso de prueba, las características de forma y espectro del pulso de prueba están gobernados por los efectos de XPM y GVD, mientras que el pulso de bombeo tiene ciertas características resultantes de estos dos efectos combinados. En la figura 1.19 se muestran los efectos de XPM únicamente (ausencia de GVD). El efecto de GVD es reducir la extensión de la asimetría; una parte de la potencia de la señal es transportada por los componentes espectrales desplazados hacia longitudes de onda superiores. El efecto más notable de GVD es en la forma del pulso de prueba, en ausencia de GVD la forma del pulso permanece inalterada, XPM solo altera la fase del pulso.

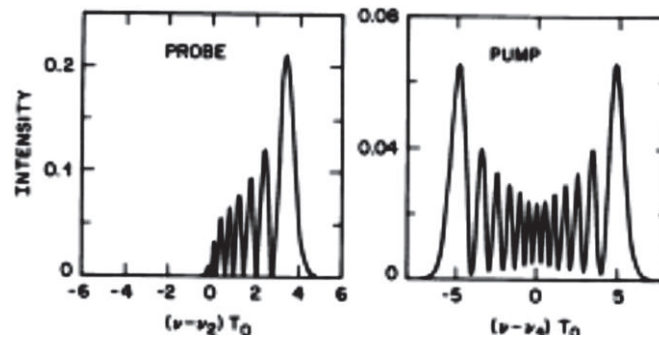


Figura 1. 19 Espectro del pulso de prueba y de bombeo ignorando los efectos de GVD [12]

El efecto de GVD es reducir la extensión de la asimetría; una parte de la potencia de la señal es transportada por los componentes espectrales desplazados hacia longitudes de onda superiores. El efecto más notable de GVD es en la forma del pulso de prueba, en ausencia de GVD la forma del pulso permanece inalterada, XPM solo altera la fase del pulso.

Sin embargo en presencia de GVD diferentes partes del pulso de prueba se propagan a diferentes velocidades debido al chirp inducido por XPM. El resultado es una forma asimétrica como se observa en la primera fila de la figura 1.17. El pulso de prueba desarrolla oscilaciones rápidas cerca del borde posterior del pulso mientras que la parte frontal del mismo permanece inalterada.

Se puede entender la figura 1.19 notando que el valor máximo del chirp se encuentra en el centro del pulso de prueba (como se observó en la primera fila de figura 1.17), el movimiento rápido del pulso de bombeo interactúa mayormente con el borde posterior del pulso de prueba.

Si las longitudes de onda del pulso de salida y el pulso de prueba fueran invertidas de tal forma que el pulso de bombeo interactúa con el borde frontal, las oscilaciones se desarrollarían cerca del borde frontal, debido a que el chirp inducido por XPM aumentaría la velocidad del pico del pulso de prueba con respecto al borde posterior.

El efecto del retardo inicial entre el pulso de bombeo y de prueba puede guiar a características cualitativas un poco diferentes de XPM comparadas con el mostrado

en la figura 1.17. Si el pulso de bombeo atraviesa completamente el pulso de prueba, por efectos de GVD, el espectro del pulso de prueba no será simétrico.

Experimentalmente los efectos temporales asimétricos producidos por XPM inducido, requieren el uso de pulsos en el orden de femtosegundos. La interacción de los efectos de GVD y XPM solo ocurre cuando los valores de L_D y L_W son comparables [13].

1.4.5 Efectos no lineales de orden superior [1] [12]

Estas no linealidades deben ser consideradas para los pulsos cuyo ancho es menor a los 5ps llegando a los femtosegundos, el efecto más importante asociado es el efecto Raman que involucra vibraciones moleculares.

En el caso de un solo pulso propagándose en la región anómala, GVD conduce a la aparición de intrapulsos debido a la dispersión Raman que se manifiesta a través del cambio de frecuencia.

La ecuación general que gobierna la forma del pulso considerando este efecto es la siguiente [14]:

$$\begin{aligned} \frac{dj}{dz} + \frac{1}{v_{gj}} \frac{dA_j}{dt} + \frac{i\beta_{2j}d^2A_1}{2dt^2} + \frac{\alpha_j}{2}A_j = i\gamma_j(1 - f_R)(|A_j|^2 + 2|A_m|^2)A_j \quad (1.41) \\ + i\gamma_j f_R \int_0^\infty dsh_R(s) \{ [|A_j(z, t - s)|^2 + |A_m(z, t - s)|^2] A_j(z, t) \\ + A_j(z, t - s) A_m^*(z, t - s) \exp[i(w_j - w_m)A_m(z, t)] \} \end{aligned}$$

El parámetro f_R representa la contribución de la respuesta Raman, la función h_R es la función de la respuesta Raman, β_{2j} es el coeficiente GVD, β_{1j} es el inverso de la velocidad de grupo, j es igual a 1 o 2 y m es (3-j), “A” es la variación de la amplitud del pulso. Esta ecuación es la misma NLSE vista anteriormente, solo que ahora se incluye la respuesta molecular.

Los dos primeros términos de la ecuación representan las contribuciones de los efectos SPM y XPM debido a la respuesta electrónica, los siguientes dos términos representan las contribuciones de SPM y XPM debido a las vibraciones moleculares y el último término representa la transferencia de energía entre los dos pulsos debido a la amplificación Raman.

Esta ecuación muestra que los efectos de XPM inducido afecta a los pulsos ultracortos en muchas maneras, cuando se incluye la contribución Raman, si el ancho de pulso es superior a los 5ps estos dos últimos términos tienden a cero y es por eso que no se los consideró anteriormente.

Similar al caso de un pulso simple, esas contribuciones ocasionan un desplazamiento en la frecuencia de la portadora. En un contexto de dos solitones los cambios de frecuencia pueden tener signos distintos o iguales dependiendo si la diferencia entre las portadoras de frecuencia es mayor o menor que la frecuencia donde la ganancia del efecto Raman es máxima. Como resultado de XPM la interacción de los solitones puede agravar o suprimir los cambios de frecuencia esperados cuando cada soliton se propaga solo.

1.3.7 EFECTOS NO LINEALES EN LA PROPAGACIÓN DEL PULSO [1]

Como hemos visto los efectos de SPM y XPM dan como resultado el cambio en la fase de un pulso transmitido por una fibra óptica. Para entender la magnitud del impacto de estos fenómenos (cambio de fase o chirp) y cómo interactúa con la dispersión cromática, se analizará la ecuación que gobierna la forma del pulso mientras se propaga por la fibra óptica.

Consideramos la siguiente ecuación de la magnitud del campo eléctrico asociado a un pulso óptico [1]:

$$|E(r, t)| = J(x, y)\mathcal{R}[A(z, t)e^{-i(w_0t - \beta_0z)}] \quad (1.42) \text{ El}$$

término $J(x, y)$ es la distribución transversal del campo eléctrico que es gobernado por la geometría de la fibra, $A(z, t)$ es la envolvente compleja del pulso, w_0 la frecuencia central, y $\mathcal{R} [\cdot]$ denota la parte real del argumento. Como se vio anteriormente el

índice de refracción es dependiente de la intensidad en presencia de SPM para ondas monocromáticas.

En pulsos no monocromáticos debemos modificar la expresión del índice de refracción de la siguiente manera [1].

$$\hat{n}(w, E) = n(w) + \frac{\bar{n}|A|^2}{A_e} \quad (1.43)$$

Este es el nuevo índice de refracción, el cual es dependiente de la frecuencia debido a la dispersión cromática, pero también es independiente de la intensidad, A_e es el área transversal de la fibra y $|A|^2$ es la potencia del pulso. Así mismo la expresión para la constante de propagación debe ser modificada de la siguiente forma [1]:

$$\hat{\beta}(w, E) = \beta(w) + \frac{w \bar{n}|A|^2}{c A_e} \quad (1.44)$$

Donde el término \bar{n} corresponde al índice de refracción no lineal, la intensidad del pulso " $|A|^2$ " se expresa en Watts (W) y asumimos que es la potencia del pulso óptico (estrictamente hablando solo es proporcional a la potencia). La notación utilizada será [1]:

$$\gamma = \frac{w \bar{n}}{c A_e} = \frac{2\pi \bar{n}}{\lambda A_e} \quad (1.45)$$

Con:

$$\hat{\beta} = \beta + \gamma|A|^2 \quad (1.46)$$

Donde este último término tiene la misma relación con el coeficiente β (constante de propagación), como el índice de refracción no lineal lo tiene con el índice de refracción "n". El término \bar{n} representa el índice de refracción no lineal y término " γ " es llamado *coeficiente de propagación no lineal*.

Para tener en cuenta la dependencia de la intensidad de la constante de propagación, se analizará la ecuación (1.18):

$$\frac{dA}{dz} + \beta_1 \frac{dA}{dt} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{d^2 A}{dt^2} = i\gamma |A|^2 A$$

En esta ecuación el tercer término incluye el efecto de la dispersión cromática y el primer término de la igualdad incluye el cambio de la fase del pulso que es dependiente de la intensidad.

Debido a que esta ecuación incorpora los efectos de la dispersión cromática, los efectos combinados de dispersión cromática y SPM pueden ser analizados utilizando esta ecuación como punto de partida, para ello se realiza el siguiente cambio de variables [1]:

$$\tau = \frac{t - \beta_1 z}{T_0} \quad \xi = \frac{z}{L_D} = \frac{z |\beta_2|}{T_0^2} \quad U = \frac{A}{\sqrt{P_0}} \quad (1.47)$$

De esta manera la expresión 1.18 puede escribirse de la siguiente forma [1]:

$$i \frac{dU}{d\xi} - \frac{\text{sgn}(\beta_2) (d^2 U)}{2 d\tau^2} + N^2 |U|^2 U = 0 \quad (1.48)$$

Donde

$$N^2 = \gamma P_0 L_D = \frac{\gamma P_0}{|\beta_2| / T_0^2} \quad (1.49)$$

El cambio de variables puede ser interpretado de la siguiente forma:

Puesto que un pulso se propaga con velocidad β_1 (esto es en ausencia de dispersión cromática), $t - \beta_1 z$ es el eje temporal en el marco de referencia moviéndose con el pulso. La variable τ es el tiempo en este marco de referencia pero en unidades de T_0 que es una medida del ancho de pulso. ξ es la medida de distancia en unidades de “distancia de dispersión cromática” donde $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$, P_0 es la potencia inicial del pulso.

La distancia no lineal es expresada por la cantidad $(1/\gamma P_0)$ y es denotado por L_{NL} , este parámetro sirve como una media normalizada de la distancia Z hablando de

efectos no lineales. Los efectos de SPM pueden ser ignorados para los pulsos que se propagan distancias menores a L_{NL} .

Se puede escribir el parámetro “N” introducido en la ecuación NLSE como $N^2 = L_D/L_{NL}$, ésta es la proporción de las longitudes de los efectos SPM y dispersión cromática. Si $N \ll 1$ los efectos no lineales pueden ser ignorados, en otras palabras el tercer término de la ecuación NLSE puede ser ignorado.

Para valores arbitrarios de N la ecuación debe ser resuelta numéricamente y esas soluciones son importantes para entender los efectos de la dispersión cromática y los efectos no lineales.

Para analizar el efecto de SPM para pulsos gaussianos, debemos ignorar la dispersión cromática, por lo cual la expresión resultante es la siguiente [1]:

$$U(z, t) = U(0, \tau) e^{iz|U(0, \tau)|^2/L_{NL}} \quad (1.50)$$

Nótese que la envolvente inicial del pulso $U(0, \tau)$ es arbitraria, esto es verdad para todas las formas de pulso. SPM ocasiona chirp sin importar la forma del pulso y éste modifica los efectos de ensanchamiento de pulso de la dispersión cromática. Es decir SPM afecta la forma espectral de los pulsos inclusive cuando la dispersión presente es cero.

1.4 FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO NORMALIZADAS DE DISPERSIÓN DESPLAZADA

Este tipo de fibras tiene mejores propiedades de las que se había soñado hace 30 años, sin embargo no es ideal, la absorción de la fibra de vidrio ha sido reducida hasta un mínimo teórico, y pequeñas mejoras han sido posibles sin necesidad de cambiar a fibras de otra familia de materiales.

En las fibras monomodo, la mayor preocupación es la dispersión cromática de material o espectral, causado por la variación de la velocidad de la luz a través de la fibra óptica. La dispersión cromática es la suma de dos cantidades, la dispersión producida por el material (dispersión cromática espectral) y la producida por la geometría del mismo (dispersión cromática de guía de onda), estos fenómenos pueden tener diferente signo dependiendo en si la velocidad de la luz aumenta o disminuye con la longitud de onda. Éstos se cancelan en $1.31 \mu\text{m}$ y corresponde a la longitud de onda de dispersión nula para las fibras monomodo estándar de índice escalonado. Ésta es una longitud de onda muy útil pero no es la ideal debido a que la menor pérdida en las fibras de vidrio se encuentra en $1.55 \mu\text{m}$; la dispersión de material es una característica inherente del silicio y no puede ser cambiada sin alterar la composición del material, del cual depende la atenuación. Sin embargo es posible cambiar la dispersión mínima cambiando la dispersión de guía de onda.

La dispersión de guía de onda aparece debido a que la propagación de la luz dentro de la guía de onda, en este caso la fibra óptica, depende de la longitud de onda así como de las dimensiones de la fibra óptica. Disminuir la longitud de onda permite aumentar el diámetro de fibra, y aumentando la longitud de onda lleva a disminuir el diámetro de la fibra.

En este proyecto se realizará el estudio para dos categorías de fibra óptica las cuales se describe a continuación.

1.4.1 FIBRA MONOMODO DE DISPERSIÓN DESPLAZADA NULA (*ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER*, NORMA G.653) [1] [15]

Esta fibra está diseñada para tener una dispersión cromática nula en la ventana de $1.55\mu\text{m}$ para la cual la atenuación es mínima. Esto se consiguió aumentando la magnitud de la dispersión cromática de guía de onda.

La velocidad de grupo es comúnmente expresada en términos del parámetro de dispersión D , donde $D = -(2\pi c/\lambda^2)\beta_2$, el coeficiente de la dispersión cromática se expresa en ps/nm.km, lo cual indica el ensanchamiento por unidad de distancia de

propagación (km) y por unidad de ancho espectral (nm). Esta expresión se la puede escribir de la siguiente forma: $D=D_M+D_W$, donde D_M es la dispersión del material y D_W es la dispersión por guía de onda.

En la longitud de onda de $1.276\mu\text{m}$ el valor de D_M es igual a 0 en fibras monomodo estándar. La dispersión cromática total D es cero alrededor de la longitud de onda de $1.31\mu\text{m}$, sin embargo en este caso la dispersión de guía de onda cambia la longitud de onda con dispersión cero unas cuantas decenas de nanómetros. Alrededor de la longitud de onda con dispersión cero, D puede aproximarse a una línea recta de pendiente negativa, como se puede observar en la figura 1.20.

Los efectos de la dispersión cromática son pequeños en la ventana de $1.3\mu\text{m}$, los sistemas que trabajan en esta ventana son limitados por la atenuación. La mayor parte de los sistemas de comunicaciones trabajan en la ventana de $1.55\mu\text{m}$ debido a que en esta región la atenuación es mínima; pero como hemos visto esta región está limitada por la dispersión cromática.

Esta limitación puede ser reducida si se desplaza la longitud de onda con dispersión cero a la banda C³ (1550nm).

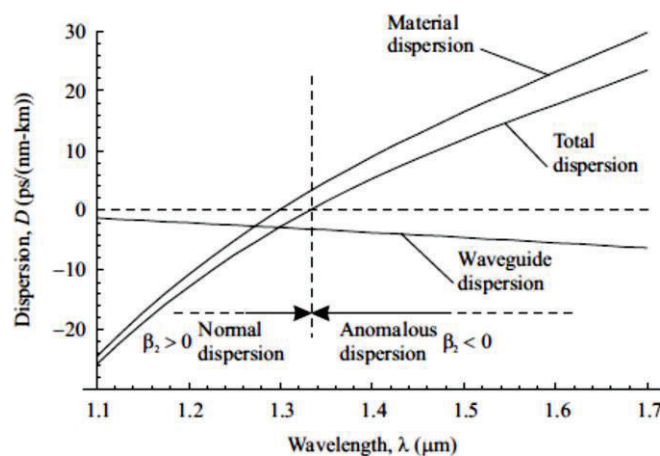


Figura 1. 20 Dispersión en función de la longitud de onda [1]

³ Banda C: 1535- 1570 nm
 Banda S: 1510- 1353 nm
 Banda L: 1570-1610 nm[27]

No es posible tener todo el control sobre el parámetro D_M (dispersión de material) pero puede ser variado sutilmente dopando el material del núcleo y del manto, sin embargo se puede variar el parámetro D_W considerablemente tanto que se puede mover la longitud de onda con dispersión cero a la banda C. La fibra con esta propiedad es llamada fibra de dispersión desplazada nula (*Dispersion-Shifted Fiber*, DSF).

Estas fibras tienen un coeficiente de dispersión máximo de 3.3ps/nm.km en la banda C y típicamente tienen dispersión cero en 1550nm [19].

Los pulsos en las fibras de silicio monomodo estándar presentan una dispersión cromática normal ($\beta_2 > 0$) bajo la longitud de onda de cero dispersión 1.3 μm , además los pulsos presentan una dispersión cromática anómala ($\beta_2 < 0$) en toda la banda C. En cambio para las fibras DSF la longitud de onda de dispersión cero está en la banda C, como consecuencia los pulsos en una parte de esta banda presentan dispersión cromática normal y los que se encuentran en el otro lado presentan dispersión cromática anómala.

La dispersión por guía de onda puede ser modificada variando el perfil de índice de refracción en la fibra tanto en el núcleo como en el manto, para el caso de la fibra DSF tenemos en la figura 1.21(b) una representación de la variación del índice de refracción en función de la distancia desde el centro del núcleo.

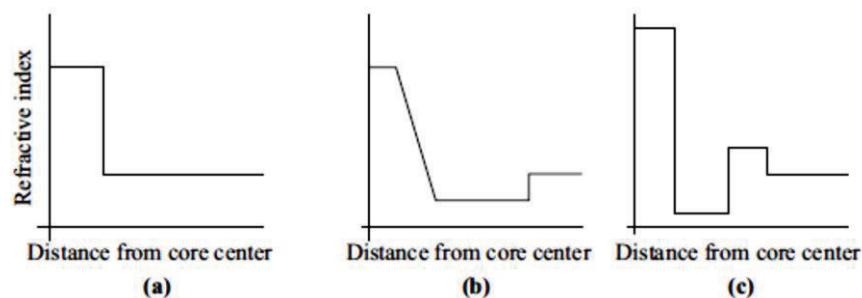


Figura 1. 21 Índice de refracción en función de la distancia al centro del núcleo [1]

Se puede observar que el índice de refracción en la figura 1.21 (b) comparado con el índice de refracción de una fibra de índice escalonado en la figura 1.21(a) tiene una variación trapezoidal en el núcleo y una variación tipo paso en el manto, característico de una fibra monomodo con una dispersión cero en $1.55 \mu\text{m}$.

Las fibras ópticas con una dispersión cromática grande (con signo contrario) son utilizadas en enlaces muy distantes para compensar la dispersión cromática acumulada, el índice de refracción de dichas fibras está representado en la figura 1.21(c).

Donde el núcleo es mucho más pequeño que una fibra monomodo estándar pero tiene un índice de refracción mucho mayor, el cual está rodeado por un manto de índice de refracción mucho menor, el cual a su vez está rodeado por un anillo de índice de refracción mayor, esto da como resultado una disminución de la dispersión cromática.

Estas fibras funcionan bien para señales transmitidas únicamente con longitudes de onda de cero-dispersión, sin embargo si la fibra óptica transmite múltiples longitudes de onda en la región de $1.55 \mu\text{m}$ estas señales pueden ser mezcladas generando interferencia y degradando el rendimiento del sistema, esto se conoce como efecto no lineal de mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*).

1.4.1.1 Fibra DSF G.653 de la ITU [15]

A continuación se presenta las características de la fibra G.653 que es del tipo DSF y sus subcategorías para los posteriores análisis y simulaciones:

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	7.8-8.5 μm
	Tolerance	$\pm 0.8 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.8 μm
Cladding non-circularity	Maximum	2.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1270 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.5 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	λ_{min}	1525 nm
	λ_{max}	1575 nm
	D_{max}	3.5 ps/(nm \times km)
	$\lambda_{0\text{min}}$	1500 nm
	$\lambda_{0\text{max}}$	1600 nm
	$S_{0\text{max}}$	0.085 ps/(nm ² \times km)
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient (Note 2)	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD _Q	0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Tabla 1.1 Tabla de características de la fibra G.653 A [15]

Se puede observar que para la subcategoría G.653.A la dispersión cromática máxima es de 3.5 ps/nm*km y la atenuación de 0.35dB/km, para efecto de simulaciones se utilizarán mediciones de fabricantes correspondientes a cada longitud de onda considerada, estos valores se encuentran publicados en la norma ITU-G650.2.

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	7.8-8.5 μm
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding non-circularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1270 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient (ps/nm \times km)	$D_{\min}(\lambda)$: 1460-1525 nm	$0.085*(\lambda - 1525) - 3.5$
	$D_{\min}(\lambda)$: 1525-1625 nm	$3.5/75*(\lambda - 1600)$
	$D_{\max}(\lambda)$: 1460-1575 nm	$3.5/75*(\lambda - 1500)$
	$D_{\max}(\lambda)$: 1575-1625 nm	$0.085*(\lambda - 1575) + 3.5$
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient (Note 3)	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD _Q (Note 2)	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Tabla 1.2 Tabla de características de la fibra G.653 B [15]

Se puede observar que los parámetros de dispersión, atenuación, diámetro y rango de operación para la categoría G.653.B son idénticos a los presentados en la fibra G.653.A, y puesto que éstos son los únicos parámetros considerados en los fenómenos SPM y XPM, solo se tomará en consideración la fibra G.653.A para simulación, lo mismo ocurre con la recomendación G.654 por ello no se la toma en cuenta en el presente trabajo.

1.4.2 FIBRA MONOMODO DE DISPERSIÓN DESPLAZADA NO NULA (NZDSF; *NON-ZERO DISPERSION-SHIFTED FIBER*, NORMA G.655) [1]

Como se observó, la fibra DSF mitiga los efectos de dispersión cromática en la ventana de 1.55 μ m, desafortunadamente esto no es útil para sistemas WDM por la aparición de otros fenómenos no lineales como la mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*).

Las consecuencias de estos fenómenos no lineales (debido a la interacción de ondas que viajan a diferentes velocidades de grupo) pueden ser mitigadas si un poco de la dispersión cromática se presenta en la fibra. Esto llevó a la creación de fibras NZDSF (*Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*) las cuales tienen un coeficiente de dispersión cromática entre 1 y 6 ps/nm-km o entre -1 y -6 ps/nm-km en la ventana de 1.55 μ m, esto disminuye el impacto de los efectos no lineales conservando la mayor parte de ventajas de la fibra DSF.

Todas las fibras NZ-DSF son diseñadas para tener un pequeño valor de dispersión en la banda C, la longitud de onda de dispersión cero se encuentra fuera de la banda C, y puede estar en la banda S o L. En estos casos una gran porción de la banda alrededor de la longitud de onda de dispersión cero se vuelve inusable debido al efecto de la mezcla de cuatro longitudes de onda.

En adición a tener un pequeño valor de dispersión cromática es importante tener una pequeña pendiente de la dispersión cromática con respecto a la longitud de onda, de esta manera se reduce la propagación de la dispersión cromática acumulada entre los diferentes canales de un sistema, en el caso de tener una propagación en una distancia pequeña, la dispersión cromática acumulada en los diferentes canales puede volverse uniforme y es posible compensar este fenómeno con un simple compensador de dispersión cromática para todos los canales, el cual es más económico que utilizar uno para cada canal.

Como se ha visto este tipo de fibra posee un pequeño valor de dispersión cromática en la banda de 1.55 μ m, desafortunadamente este tipo de fibra tiene un área efectiva

pequeña, es por ello que se han desarrollado fibras NZ-DSF con una área efectiva grande (sobre los $70 \mu m^2$) también llamada LEAF (*Large Effective Area Fiber*), cuya ventaja es una mejor compensación a la dispersión cromática y otras no linealidades, el inconveniente de este tipo de fibra es que tienen una pendiente de dispersión cromática mayor, alrededor de 0.11 ps/nm-Km^2 comparado con los 0.7 ps/nm-Km^2 de otras fibras NZ-DSF.

En la siguiente figura 1.24 se puede observar los perfiles de índices de refracción tanto para una fibra NZDSF (a) como para una fibra LEAF (b):

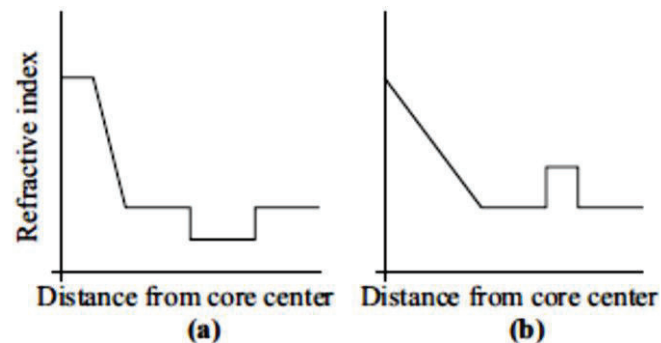


Figura 1. 22 Índice de refracción en función de la distancia al núcleo [1]

Este tipo de fibra están normadas por las recomendaciones de la ITU G.655 y G.656, en el presente trabajo se realizará el análisis para las fibras que cumplen con la recomendación G.655 puesto que las características de ambas recomendaciones son similares.

En la siguiente sección se presentarán las características de cada una de las fibras que se utilizarán para las respectivas simulaciones, los valores de área efectiva se han tomado de la normativa ITU G.650.2.

1.4.4 Fibra G.655 de la ITU [16]

A continuación se presentan las tablas según la recomendación de la ITU G 655 y sus subcategorías:

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.8 μm
Cladding non-circularity	Maximum	2.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.50 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1530-1565 nm	λ_{min} and λ_{max}	1530 nm and 1565 nm
	Minimum value of D_{min}	1.0 ps/nm·km
	Maximum value of D_{max}	10.0 ps/nm·km
	Sign	Positive or negative
	$D_{max} - D_{min}$	≤ 5.0 ps/nm·km
Chromatic dispersion coefficient Wavelength range: 1565-1625 nm	λ_{min} and λ_{max}	TBD
	Minimum value of D_{min}	TBD
	Maximum value of D_{max}	TBD
	Sign	Positive or negative
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	(Note 1)

Tabla 1.3 Tabla de características de la fibra G.655 C [16]

En la tabla 1.3 se pueden observar todas las características relevantes para esta categoría de fibra.

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding non-circularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient (ps/nm·km)	$D_{min}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{7.00}{90}(\lambda - 1460) - 4.20$
	$D_{min}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{2.97}{75}(\lambda - 1550) + 2.80$
	$D_{max}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29$
	$D_{max}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20$

Tabla 1.4 Tabla de características de la fibra G.655 D [16]

En estas tablas se puede observar que los parámetros de dispersión pueden ser positivos o negativos, por lo cual para las simulaciones consideraremos ambos casos. Los valores de área efectiva serán tomados del Anexo B.

Las longitudes de onda en las simulaciones serán aquellas donde existan cambios significativos de dispersión, para esto se utilizará la información provista de mediciones experimentales por parte de los fabricantes, esta información se encuentra publicada en la norma ITU G.663.

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	8-11 μm
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 μm
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding non-circularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1450 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient (ps/nm·km)	$D_{min}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{5.42}{90}(\lambda - 1460) + 0.64$
	$D_{min}(\lambda)$: 1550-1625 nm	$\frac{3.30}{75}(\lambda - 1550) + 6.06$
	$D_{max}(\lambda)$: 1460-1550 nm	$\frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$

Tabla 1.5 Tabla de características de la fibra G.655 E [16]

En la recomendación vigente de la ITU G.655 ya no se toma en cuenta a las categorías G655.A y G655.B, es por ello que en el presente trabajo no se considerarán dichas categorías [15].

Para este tipo de fibra, y por ser similar en las características a la categoría G.655.D se utilizarán valores de dispersión diferentes obtenidos de la norma G.663, de esta manera se contemplarán la mayoría de variaciones de dispersión cromática.

CAPÍTULO 2

SIMULACIÓN DE LOS FENÓMENOS SPM Y XPM

En este capítulo se realizarán simulaciones de SPM y XPM tomando en cuenta los principales parámetros de transmisión, tales como son: longitud de onda, velocidad de transmisión, longitud de fibra, potencia de transmisión y tipo de fibra.

Para cada uno de los casos se identificarán cuáles son las condiciones en las que los fenómenos de SPM y XPM empiezan a manifestarse.

Para obtener la relación entre estos fenómenos y los parámetros de transmisión, se utilizarán las herramientas de software: Matlab y OptiSystem, que ayudan a determinar los valores relevantes como son: Longitud de dispersión, Longitud no lineal, entre otros parámetros.

Los resultados mostrados en este capítulo corresponden únicamente a las circunstancias donde los efectos no lineales son considerables, para todos los demás casos (con parámetros de transmisión inferiores) no existen problemas de no linealidades.

Para obtener fidelidad en los resultados mediante el software utilizado, se realizarán en primera instancia ejemplos de cálculo encontrados en [1], de esta manera se garantizará el correcto funcionamiento de las herramientas utilizadas, así como los modelos matemáticos y aproximaciones utilizados.

La nomenclatura utilizada es la siguiente: Longitud de onda (λ), velocidad de transmisión (V_t), potencia inicial del pulso (P_0), distancia (L), separación entre canales (Δ_f) y atenuación (α).

La siguiente sección contempla ejemplos de aplicación de las ecuaciones vistas anteriormente, para determinar los parámetros necesarios que se deben ingresar en

el software utilizado. En las simulaciones presentadas se utiliza una distancia máxima de 100km para realizar la comparación de la evolución de los pulsos, sin embargo en el anexo A se presentan distancias superiores según el caso.

2.1 EJEMPLO DE CÁLCULO DE SPM PARA ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPECTRAL

Los parámetros utilizados en los siguientes ejemplos son únicamente para comprobar los valores teóricos obtenidos de las ecuaciones vistas anteriormente, con los resultantes del programa en línea encontrado [16], para una fibra monomodo estándar. Esta herramienta provee de una interfaz gráfica en donde se puede ingresar los parámetros correspondientes para mostrarnos el resultado de la relación $\frac{T_L}{T_0}$, además de una curva en función de la distancia para darnos una idea de cómo va a evolucionar el pulso.

Se considera un enlace de 100km con tres potencias distintas de 1mW, 10mW y 20 mW, en un sistema que trabaja a una velocidad de transmisión de 10Gbps en la ventana de 1550nm. Datos:

Atenuación: $\alpha = 0.35\text{dB/Km}$

Distancia: $L = 100\text{km}$

Velocidad de transmisión: $V_t = 10\text{Gbps}$

Longitud de onda: $\lambda = 1550\text{nm}$.

La primera variable a encontrar es la longitud efectiva la cual se calcula utilizando la ecuación (1.4).

Es necesario notar que para poder resolver la ecuación se requiere expresar α en unidades lineales, debido a que sus unidades son dB/km, de la siguiente manera [17]:

$$\alpha' = \alpha \frac{\ln(10)}{10}$$

$$\alpha' = 0.35 \frac{2.3}{10} = 0.0805 \approx 0.081$$

Para nuestro caso $\alpha' = 0.081 \text{ km}^{-1}$

Una vez que tenemos el coeficiente α expresado en km^{-1} ya se puede calcular la ecuación de longitud efectiva aplicando la ecuación (1.4):

$$Le = \frac{1 - e^{-\frac{0.081}{\text{km}} * 100\text{km}}}{0.081/\text{km}}$$

$$Le = 12.34 \text{ km}$$

El siguiente parámetro que se debe calcular es la longitud no lineal utilizando la ecuación (1.19).

El parámetro “ γ ” toma el valor de $2.6 (\text{W} * \text{km})^{-1}$ [1] [16] para fibras monomodo estándar y es el valor con el cual se trabajará en los siguientes ejemplos, puesto que se considera para todos ellos esta misma fibra. Para el caso de las simulaciones se ha implementado un programa en Matlab que ayuda a calcular de manera precisa este valor, este programa se lo explicará más adelante. En las simulaciones posteriores se calculará el parámetro “ γ ” utilizando la ecuación (1.32)

Entonces tenemos que la longitud no lineal L_{NL} es la siguiente:

Caso 1: $P_0 = 1\text{mW}$

$$L_{NL} = \frac{1}{2.6 \frac{1}{\text{W} * \text{Km}} * 1\text{mW}}$$

$$L_{NL} = 384 \text{ km}$$

Caso 2: $P_0 = 10\text{mW}$

$$L_{NL} = \frac{1}{2.6 \frac{1}{\text{W} * \text{Km}} * 10\text{mW}}$$

$$L_{NL} = 38.4 \text{ km}$$

Caso 3: $P_0 = 20 \text{ mw}$

$$L_{NL} = \frac{1}{2.6 \frac{1}{\text{W} * \text{Km}} * 20\text{mW}}$$

$$L_{NL} = 19.23 \text{ km}$$

El siguiente parámetro a calcular es la distancia de dispersión L_D utilizando la ecuación (1.19).

El parámetro β_2 en la fibra monomodo estándar tiene el valor de $-20 \frac{\text{ps}^2}{\text{km}}$ en la banda C, T_0 es el ancho del pulso inicial el cual es 50ps (como se vio en el capítulo 1 el ancho de un pulso gaussiano corresponde a la mitad del tiempo de bit) para nuestro caso, por tanto la distancia de dispersión es:

$$L_D = \frac{(50\text{ps})^2}{\left| -\frac{20\text{ps}^2}{\text{km}} \right|}$$

$$L_D = 125\text{km}$$

Utilizamos estos valores en la expresión (1.23), para determinar numéricamente el ensanchamiento sufrido por el pulso debido al chirp inducido por SPM.

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{1 + \sqrt{2} \frac{L_e}{L_{NL}} * \frac{L}{L_D} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} * \frac{L_e^2}{L_{NL}^2} \right) \frac{L^2}{L_D^2}}$$

Caso 1: $P_0=1\text{mW}$:

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{0.97 + (1.0008) \frac{L^2}{L_D^2}}$$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.269$$

Ahora este valor se lo compara con el resultado obtenido en la herramienta de simulación encontrada en [16 Utilizando esta herramienta para nuestro ejemplo tenemos el resultado siguiente:

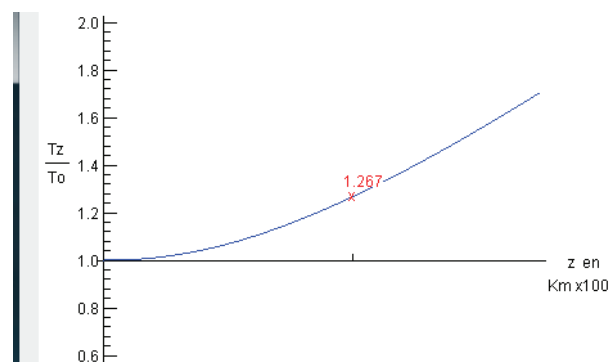


Figura 2. 1 Resultado gráfico de $\frac{T_L}{T_0}$ para 1mW

Se puede observar que el valor teórico y el simulado son muy cercanos, con un error menor del 1%, es necesario notar que la variable T_z es la misma que la utilizada en este documento T_L

Caso 2: $P_0 = 10\text{mW}$:

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{0.64 + (1.082)0.64}$$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.154$$

El resultado de la simulación en estas condiciones es el siguiente:

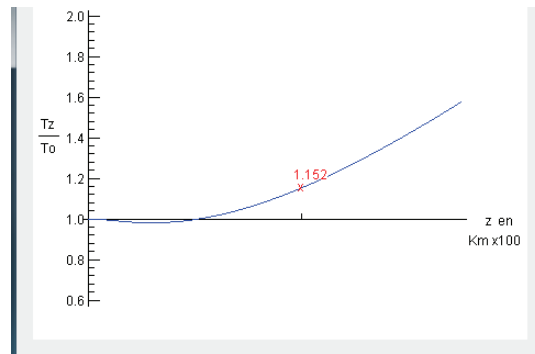


Figura 2. 2 Resultado gráfico de $\frac{T_L}{T_0}$ para 10mW

Caso 3: $P_0 = 20\text{mW}$:

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{0.28 + (1.31)0.64}$$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.057$$

El resultado de la simulación en estas condiciones es el siguiente:

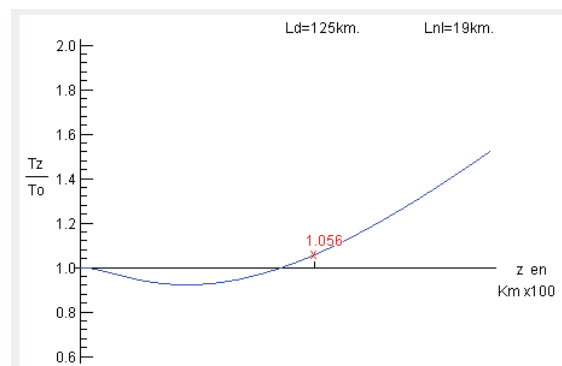


Figura 2. 3 Resultado gráfico de $\frac{T_L}{T_0}$ para 20mW

En estos ejemplos se puede observar que los valores calculados y los obtenidos en el software son muy cercanos.

2.1.1 LIMITACIONES IDENTIFICADAS EN EL SOFTWARE [16]

En varios ejemplos se ha observado que el programa encontrado en la página web mencionada no tiene una resolución muy grande, por ejemplo para el caso:

Longitud de onda: $\lambda=1550\text{nm}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 20\text{ Gbps}$

Potencia del pulso: $P_0=510\text{mW}$

Distancia: $L=20\text{ km}$

Se obtiene el siguiente resultado:

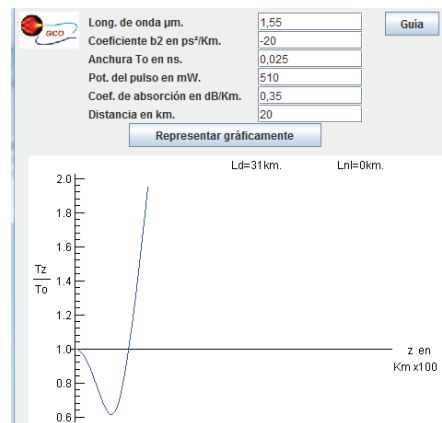


Figura 2. 4 Resultado gráfico de T_L/T_0 para una velocidad de 20Gbps a una distancia de 20km

Se puede observar que el valor de T_L/T_0 se encuentra fuera de rango, es por ello que se implementa el siguiente programa en Matlab para solucionar este problema.

2.1.2 PROGRAMA EN MATLAB PARA CALCULAR $\frac{T_L}{T_0}$ Y φ_{max}

Para compensar esta limitación se ha realizado un programa en Matlab, el cual permite hacer el mismo cálculo con su respectiva gráfica, el código del programa es el siguiente:

```
%%%%%%%%%% relación TL/T0
clc
a= input('ingrese atenuación (dB/km): ');
```

```

alfa= a* (log(10)/10)
L= input('ingrese la longitud del enlace(km): ');
To = input('ingrese el ancho de pulso (ps): ');
%el siguiente término es el parámetro de dispersión cromática
beta= input('ingrese el valor de dispersión ps^2/km :') ;
%Cálculo de longitud efectiva
Le = (1- exp(-alfa*L))/alfa
%Ingreso del valor de longitud de onda
lam = input('ingrese la longitud de onda en (um):');
p= input('ingrese la potencia del pulso inicial(mW): ');
po= p/1000;
% calculo de coeficiente de propagación no lineal
ro = ((6.2832*2.6*10^-8)/(lam* 80))* 1*10^9
% Calculo de longitud no lineal
lnl = 1/(ro*po)
% Calculo de longitud de dispersión
LD = ( To^2 )/beta
r= (1 + sqrt(2)*(Le*L/(lnl*LD)));
s= (1 + (4/(3*sqrt(3)) * (Le^2/lnl^2)));
% cálculo de relacion TL/T0
relaciontemporal = sqrt(r + s* ((L^2)/(LD^2)))
limite= L+10;
z = 0:limite;
spmng = sqrt( (1 + sqrt(2).*(Le.*z./(lnl.*LD)))+( 1 + (4./(3.*sqrt(3)) .* (Le.^2./lnl.^2))).*
((z.^2)./(LD.^2)));
plot(z,spmng,'LineWidth', 2)
title('impacto del chirp producido por SPM')
xlabel('distancia (km)')
ylabel('T/To');
grid on
hold on%z = L;%plot (L, relaciontemporal,'--ro', 'MarkerSize', 10 )
hold off
% calculo de valor phi max
phimax= Le/lnl;
phimax = phimax/3.1416;
phimax

```

Para comprobar la correcta programación se realizará la resolución de los tres casos anteriormente propuestos:

a) **Caso 1:** $P_0 = 1\text{mW}$

```

ingrese atenuacion (db/km): 0.35
ingrese la longitud del enlace(km): 100
ingrese el ancho de pulso (ps): 50
ingrese la potencia del pulso inicial(mW): 1

chirp =

    1.2665
  
```

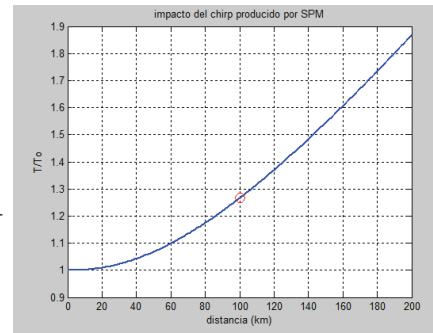


Figura 2. 5 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 1mW en Matlab

Se puede observar en la figura 2.5 que el programa implementado en Matlab funciona correctamente puesto que nos muestra el valor de la relación T_L/T_0 que por facilidad se le ha denominado chirp en el código del programa.

b) **Caso2:** $P_0 = 10\text{mW}$

```

ingrese atenuacion (db/km): 0.35
ingrese la longitud del enlace(km): 100
ingrese el ancho de pulso (ps): 50
ingrese la potencia del pulso inicial(mW): 10

chirp =

    1.1517
  
```

Figura 2. 6 Resultado del programa en Matlab para T_L/T_0 (chirp) para 10mW en Matlab

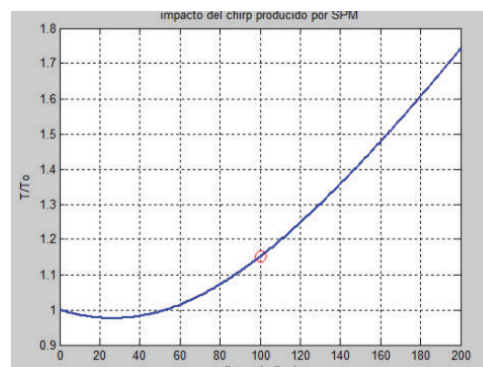


Figura 2. 7 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 10mW en Matlab

c) **Caso 3:** $P_0=20\text{mW}$

```

ingrese atenuacion (db/km): 0.35
ingrese la longitud del enlace(km): 100
ingrese el ancho de pulso (ps): 50
ingrese la potencia del pulso inicial(mW): 20

chirp =

    1.0560

```

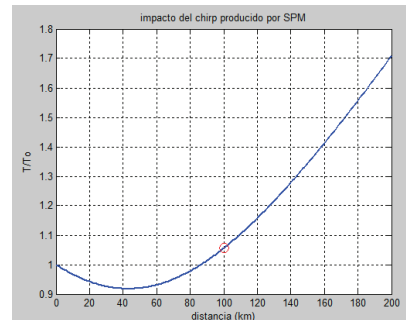


Figura 2. 8 Resultado gráfico de T_L/T_0 para 20mW en Matlab para 20mW en Matlab

Se puede observar que los resultados son los mismos que los obtenidos de forma analítica y mediante el programa implementado [21].

Para comprobar que este programa no tiene las limitaciones vistas anteriormente se realizará un cuarto caso con las mismas condiciones propuestas anteriormente.

d) **Caso 4:**

Longitud de onda: $\lambda= 1550\text{nm}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 20 \text{ Gbps}$

Ancho del pulso = $1/2V_t = 25\text{ps}$

Potencia del pulso: $P_0= 510\text{mW}$

Distancia: $L=20 \text{ km}$

```

ingrese atenuacion (db/km): 0.35
ingrese la longitud del enlace(km): 20
ingrese el ancho de pulso (ps): 25
ingrese el valor de dispersion ps^2/km :-20
ingrese la ongitud de onda en (um):1.55
ingrese la potencia del pulso inicial(mW): 510

relaciontemporal =

    6.6471

```

Figura 2. 9 Resultado del programa en Matlab para 510mW con: $V_t= 20\text{Gbps}$ y una distancia de 20km.

Para comprobar este resultado se utilizará la resolución analítica con el mismo procedimiento anteriormente hecho:

$$L_e = \frac{1 - e^{-\frac{0.081}{km} * 20km}}{0.081/km}$$

$$L_e = 9.9 \text{ km}$$

$$L_{NL} = \frac{1}{2.6 \frac{1}{W * Km} * 510mW}$$

$$L_{NL} = 0.75 \text{ km}$$

$$L_D = \frac{25^2 ps}{-20ps^2/km}$$

$$L_D = -31.25km$$

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{1 + \sqrt{2} \frac{9.9}{0.75} * \frac{20}{-31.25} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} * \frac{98.01}{0.5625}\right) \frac{400}{976.56}}$$

$$\frac{T_L}{T_0} = \sqrt{-10 + 55.34}$$

$$\frac{T_L}{T_0} = 6.68$$

Se puede observar que los resultados son muy próximos, adicionalmente este programa ayuda a obtener los valores de las diferentes variables, de esta forma se puede obtener la información necesaria rápidamente para futuros cálculos.

2.1.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS EJEMPLOS

Se puede apreciar en los valores obtenidos de $\frac{T_L}{T_0}$ en cada ejemplo visto anteriormente, que conforme se aumenta la potencia inicial, en la distancia de 100 km el chirp inducido disminuye, esto se debe a que a medida que se incrementa la

potencia la compresión inicial del pulso aumenta, sin embargo la pendiente de crecimiento de chirp aumenta ocasionando que el pulso se ensanche más rápidamente.

Como conclusión de éste análisis se puede afirmar que los resultados teóricos y experimentales fueron casi iguales con un error que no supera el 2%, por tanto se puede concluir que cualquiera de las herramientas de simulación vistas es correcta, por lo cual para futuros análisis nos referiremos a los resultados ya sea de la página web [21] o del programa realizado, dependiendo de las condiciones que estemos analizando.

2.2 SIMULACIÓN CON OPTISYSTEM

OptiSystem es un software dedicado para la simulación de redes con fibra óptica, permite al usuario planificar, probar, diseñar y simular enlaces ópticos en la capa de transmisión de las redes modernas ópticas [13].

Se ha elegido este programa frente a otras opciones por su gran facilidad de uso, además el modelamiento matemático que utiliza es el mismo que el analizado en este documento.

2.2.1 SIMULACIÓN DE SPM CON OPTISYSTEM

En esta sección se realizarán ejemplos de simulación de tal manera que se pueda observar el impacto de SPM en una señal, también se presentarán los valores calculados de $\frac{T_L}{T_0}$ para poder observar como en efecto la señal se comprime o se ensancha, tanto en espectro como temporalmente.

2.2.1.1 Diagrama para la simulación de SPM con OptiSystem

El diagrama implementado con OptiSystem para simular el efecto no lineal SPM se muestra en la figura 2.11.

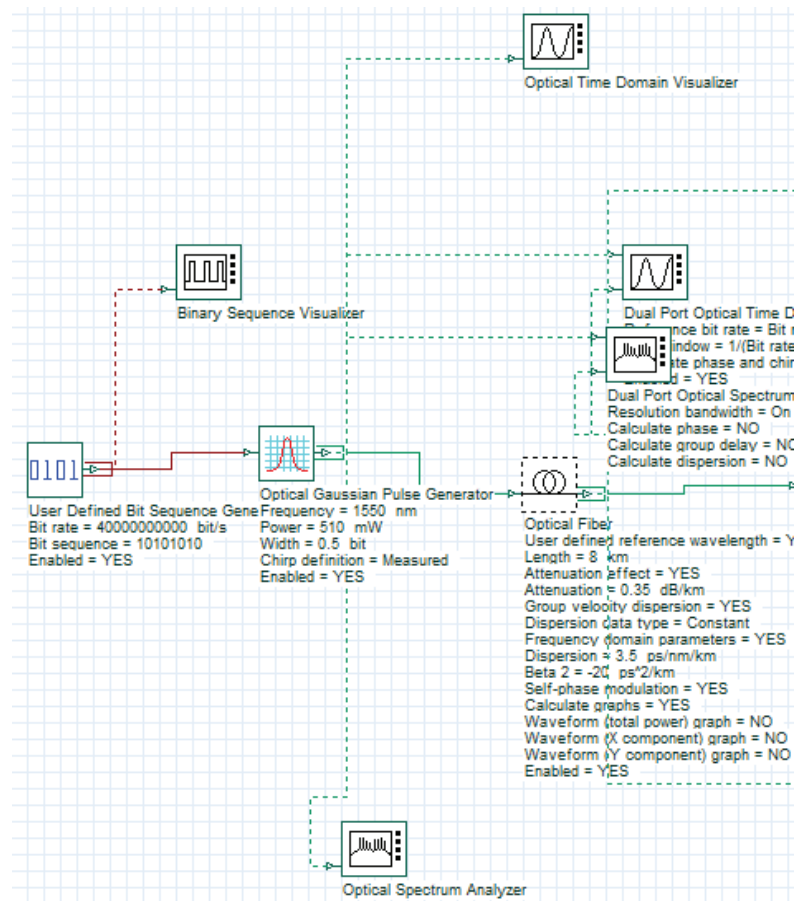


Figura 2. 10 Diagrama empleado para la simulación de SPM

Los elementos utilizados que se puede observar en la figura son:

- Un generador de secuencia de bits.- En este bloque se define la velocidad de transmisión y la secuencia de bits a transmitir.
- Un generador de pulsos gaussianos.- Este bloque se conecta directamente con el generador de secuencia de bits, este bloque tiene como parámetros la potencia de transmisión, la longitud de onda de la señal resultante y el ancho del pulso gaussiano.
- Un bloque de fibra óptica.- Este bloque se conecta directamente con el generador de pulsos gaussianos, como se puede observar en la figura en este bloque se ingresan todas las características de la fibra, que para este estudio son: Longitud, coeficiente de atenuación, dispersión cromática, área efectiva.

- Visualizadores temporales y espectrales.- estos bloques permiten observar la forma de la señal tanto temporalmente como espectralmente.

2.2.1.2 Ejemplos de simulación de SPM con OptiSystem

Los siguientes ejemplos se realizaron para comprobar la correcta configuración del programa implementado, se va a utilizar la misma fibra vista en los ejemplos anteriores de la sección 2.1 y se utilizará el mismo procedimiento para el cálculo de los valores teóricos T_L/T_0 . En los siguientes casos se considera una potencia elevada (510mW) para observar el cambio del espectro producido por SPM, se utilizará una fibra monomodo estándar: ITU G.652.A.

Caso 1

Potencia: $P_0=510$ mW

Velocidad de transmisión: $V_t= 40$ Gps

Distancia: $L=7.5$ km

Coefficiente de atenuación: $\alpha= 0.35$ dB/km

Longitud de onda: $\lambda=1550$ nm

Utilizando esta información obtenemos el valor $\frac{T_L}{T_0}$:

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.995$$

En la simulación la forma y el ancho de los pulsos inicial y final correspondiente son:

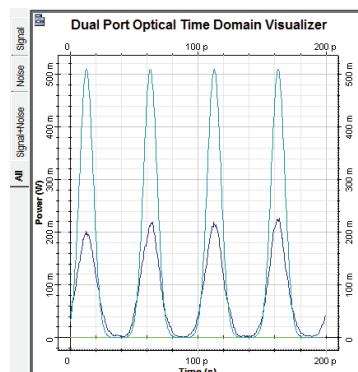


Figura 2. 11 Resultado de la simulación de SPM para el caso 1

Se puede observar que el resultado de la relación $\frac{T_L}{T_0}$ es aproximadamente igual a la unidad, esto quiere decir que teóricamente el pulso permanece sin alteraciones en su ancho. Se puede observar en la figura 2.11 que el ancho de pulso inicial (color celeste) es prácticamente igual al del pulso al final de la fibra óptica (color azul), por lo tanto el resultado teórico concuerda con la simulación.

El siguiente análisis se lo realiza para el espectro de la señal, el resultado obtenido en Matlab para el cambio de fase máximo y el ensanchamiento espectral es el siguiente:

```
relaciontemporal =
    0.9972

phimax =
    2.3757
```

El valor de $\varphi_{\text{máx}}$ es superior a la unidad, como se observó en la figura 1.14 se espera que el espectro de la señal se vea afectado drásticamente, la simulación en OptiSystem muestra el siguiente resultado:

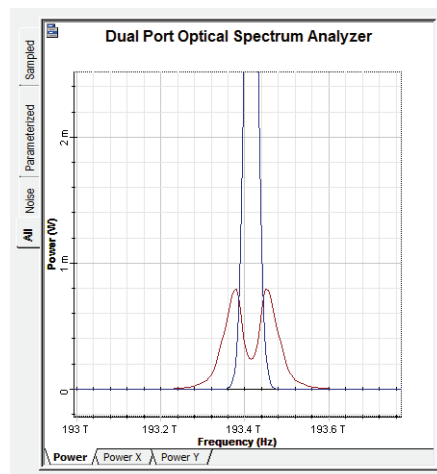


Figura 2. 12 Resultado espectral de la simulación de SPM para el caso 1

Se puede observar que el espectro (inicialmente en color azul) ha cambiado (figura de color rojo) en su forma y se ha ensanchado, debido a la elevada potencia de

transmisión con la que se ha propuesto el ejemplo, confirmando que el valor de $\phi_{\text{máx}}$ en efecto ayuda a determinar si la forma del espectro se verá afectada.

Caso 2:

Potencia: $P_0=510$ mW

Velocidad de transmisión: $V_t=40$ Gbps

Distancia: $L=5$ km

Coefficiente de atenuación: $\alpha= 0.35$ dB/km

Longitud de onda: $\lambda= 1550$ nm

Para este caso hemos disminuido la distancia a 5km para encontrarnos con el caso de compresión de pulso, el valor teórico obtenido para $\frac{T_L}{T_0}$ es el siguiente:

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.61$$

Esto indica una compresión del pulso del 39 % aproximadamente, el resultado de la simulación muestra en el tiempo la forma y ancho de los pulsos inicial y final:

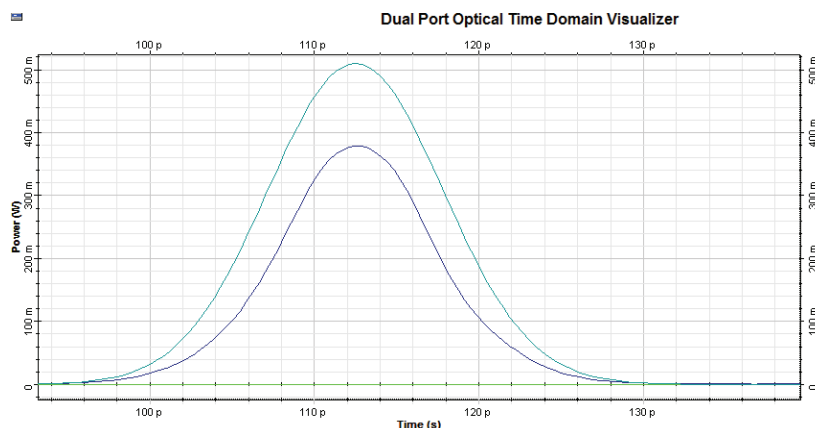


Figura 2. 13 Resultado de la simulación para SPM para el caso 2

Se puede apreciar la compresión del pulso, el ancho del pulso inicial es 11.1ps y el ancho del pulso final es 6.9ps, esto quiere decir que aproximadamente existe una compresión del 37.83%, comparando con el resultado del valor $\frac{T_L}{T_0}$ se puede observar

que la compresión teórica esperada y la obtenida en la simulación difiere en aproximadamente 1%, lo cual es aceptable.

El resultado espectral que muestra la simulación es el siguiente:

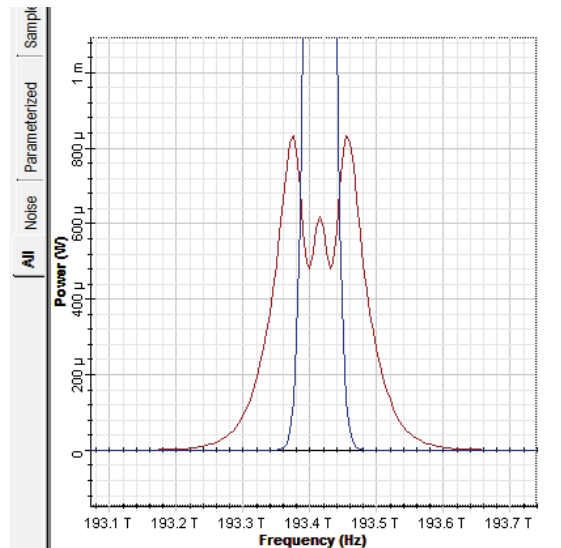


Figura 2. 14 Resultado espectral de la simulación para SPM para el caso 2

Se puede observar un ensanchamiento espectral y la aparición de nuevas componentes de frecuencia, el pulso se comprime temporalmente, esto se debe al resultado de los fenómenos de GVD y SPM; como vimos anteriormente para valores negativos de β_2 , existe una zona donde se comprime el pulso temporalmente.

Observación: Se han tomado estos parámetros de simulación para determinar el efecto de SPM, es por ello que en todas las simulaciones se observa un ensanchamiento del espectro, esto se debe a la alta potencia seleccionada (510mW) frente a la distancia relativamente pequeña (menor a 10km). Para los casos de simulación posteriores se utilizarán parámetros más cercanos a la realidad.

2.2.2 SIMULACIÓN DE XPM CON OPTISYSTEM

Para observar el impacto de este fenómeno y considerando que cualitativamente es similar a SPM, se realizará el análisis de este fenómeno en las simulaciones respectivas. Teniendo en cuenta que XPM contribuye a SPM se espera que el chirp

en las simulaciones aumente dependiendo de la separación entre canales, si la separación es muy grande predominará SPM, caso contrario observaremos el impacto de XPM.

En esta sección se consideran sistemas WDM para poder realizar el análisis y observación del impacto de XPM, esto se debe a que XPM es ocasionado por la interacción entre señales que se propagan en un mismo canal óptico, siendo los sistemas WDM donde se multiplexan varias señales lumínicas con diferentes longitudes de onda en una misma fibra óptica.

2.2.2.1 Diagrama para simulación de XPM con OptiSystem

El diagrama para simular es el siguiente:

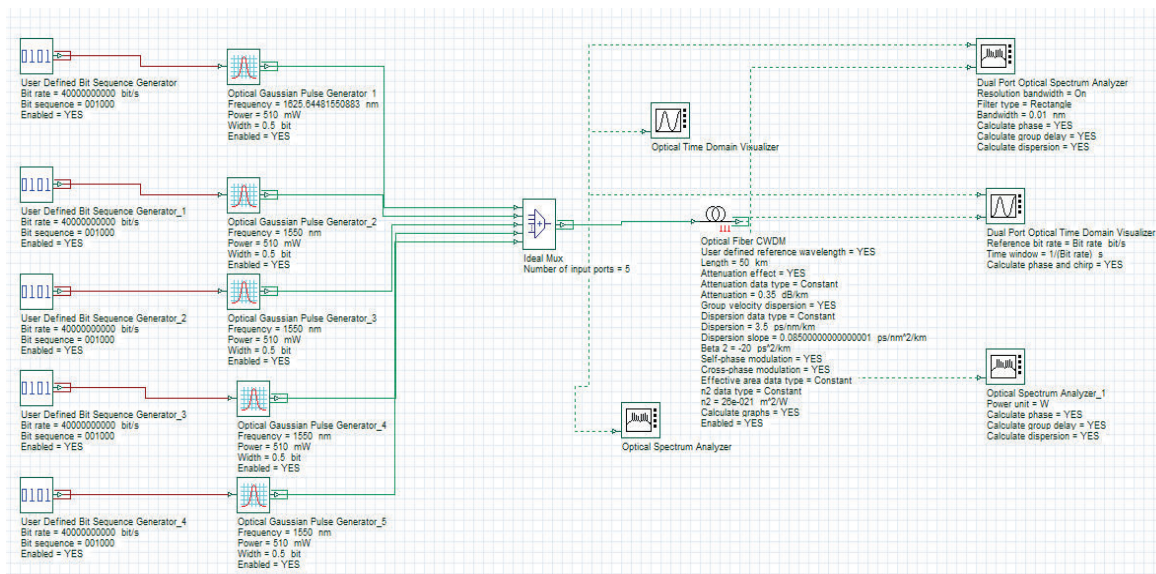


Figura 2. 15 Diagrama para la simulación de XPM

En este diagrama se puede observar que se utiliza:

- Cinco bloques generadores de secuencia de bits.- En este bloque se define la velocidad de transmisión y la secuencia de bits a transmitir.
- Cinco generadores de pulsos gaussianos.- Este bloque se conecta directamente con el generador de secuencia de bits, este bloque tiene como

parámetros la potencia de transmisión, la longitud de onda de la señal resultante y el ancho del pulso gaussiano.

- Un bloque de fibra óptica.- Este bloque se conecta directamente con el generador de pulsos gaussianos, como se puede observar en la figura en este bloque se ingresan todas las características de la fibra, que para este estudio son: Longitud, coeficiente de atenuación, dispersión cromática, área efectiva.
- Visualizadores temporales y espectrales.- estos bloques permiten observar la forma de la señal tanto temporalmente como espectralmente.
- Un bloque multiplexor.- Este bloque permite combinar las cinco señales ópticas en un mismo canal, con la debida separación entre longitudes de onda.

Para las simulaciones se considerará la normativa de la UIT G694.1, en la cual indica la separación entre canales WDM para cada caso, los demás parámetros serán los mismos utilizados en las simulaciones de SPM. Para determinar la relación que existe entre estos dos fenómenos y en qué medida XPM contribuye a SPM se analizarán las condiciones a las cuales estos fenómenos empiezan a manifestarse.

Para las simulaciones se considera una separación entre canales WDM de 100GHz, las futuras simulaciones de XPM se orientarán de tal forma que se pueda apreciar la relación que existe con SPM y cómo contribuye en la degradación de los pulsos. Para los ejemplos se utilizará la fibra monomodo estándar G.652.A, y cinco canales.

2.2.2.2 Ejemplos de simulación de XPM con OptiSystem

Caso 1:

Separación entre canales: $\Delta f=100$ GHz

Potencia de transmisión: $P_0=510$ mW

Frecuencias portadoras de cada canal: 193.2THz, 193.1THz, 193THz, 192.9THz, 192.8THz

Atenuación: $\alpha=3.5\text{dB/km}$

Distancia: $L=7.5\text{ km}$

Velocidad de transmisión: $V_t=40\text{Gbps}$

La siguiente figura muestra la respuesta en tiempo de la señal correspondiente a una secuencia de bits 001000, la misma que se ha utilizado en todos los canales, se ha optado por esta señal para poder observar cómo afecta XPM a un solo pulso.

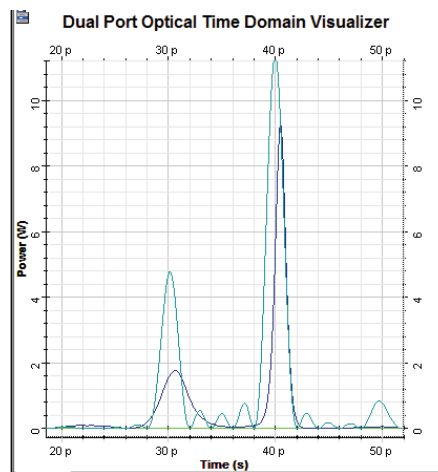


Figura 2. 16 Resultado de la simulación de XPM para el caso 1

Se puede ver que la mayor cantidad de potencia se encuentra en los 40ps, la señal de color celeste es la señal de entrada y la señal en color azul es la obtenida al recorrer toda la fibra. No se observan cambios muy significativos en la señal. El resultado de la forma espectral se muestra en la siguiente figura:

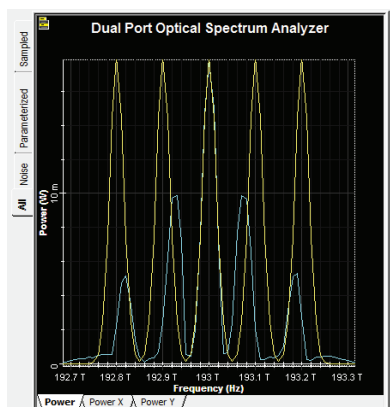


Figura 2. 17 Resultado espectral de la simulación para XPM para el caso 1

En el gráfico 2.17 la figura en color amarillo representa a la señal inicial y la azul a la señal resultante al recorrer toda la fibra. Observado estos resultados se puede concluir que el fenómeno predominante es SPM, pues debido a la gran separación entre canales XPM no tiene mayor influencia. Sin embargo ya se puede observar la aparición de nuevas componentes de frecuencia, producto de SPM y XPM conjuntamente.

2.3 SIMULACIONES PARA SPM CON DIFERENTES TIPOS DE FIBRA

Las condiciones para esas simulaciones se encuentran detalladas en el anexo A, en estas simulaciones se determinarán las condiciones en las cuales SPM aparece y empieza a tener impacto en el sistema de transmisión. El esquema es el mismo utilizado en los ejemplos anteriores (figura 2.10).

Nota: para todos los gráficos correspondientes a espectro, la línea azul corresponde a la señal antes de propagarse por la fibra óptica, y la de color rojo corresponde a la señal luego de haberse propagado por la fibra óptica.

2.3.1 SIMULACIONES DE SPM PARA LA FIBRA G.653

Para este tipo de fibra se simulará utilizado dos longitudes de onda, una de 1525nm y la otra de 1575nm que es donde se presenta la mayor dispersión y, considerando que para la longitud de onda de 1550nm la dispersión es cero por lo que no existe SPM. Para esta longitud de onda, para realizar el cálculo del parámetro β_2 se utilizó la herramienta de la página web [22] en la cual se encuentra una calculadora para obtener el valor de dicho parámetro, con los parámetros de dispersión obtenidos según la tabla de la ITU (Figura 1.21 para la categoría G.653.A) y la longitud de onda utilizada.

Para todos los casos se utilizará una secuencia de bits adecuada que permita identificar fácilmente si existe ISI.

Para estas simulaciones utilizamos el valor de área efectiva $A_{eff} = 40\mu m^2$ tomado de la norma G.650.2 de la ITU [23] que corresponde a “*Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fiber and cable*”.

2.3.1.1 Simulaciones de SPM para la longitud de onda de 1525nm

En esta longitud de onda el parámetro β_2 toma el valor de $1.23ps^2/Km$ el cual corresponde al valor de dispersión de $1ps/nm*km$ [15].

Sección 1:

Los parámetros generales para esta sección de casos son:

Tipo de fibra: G.653.A.

Velocidad de transmisión: $V_t = 10$ Gbps

Ancho del pulso $T_0 = 50ps$

Distancia: 100km

Los cuáles serán constantes para cada caso particular dentro de esta sección en donde se variará la distancia de transmisión y en algunos casos la potencia de transmisión. A continuación se presentan los casos más relevantes obtenidos de diversas simulaciones las mismas que se incluyen en anexo A, en donde los efectos no lineales pueden ser apreciados.

Caso 1.1:

Potencia del pulso: $P_0 = 1mW$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1$$

La siguiente figura 2.18 muestra el resultado de la simulación tanto en el dominio temporal (gráfico de la izquierda) como en el dominio frecuencial (grafico de la derecha).

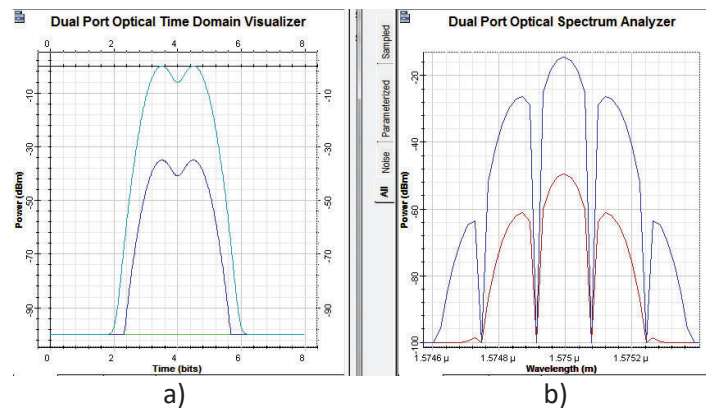


Figura 2. 18 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Como se puede evidenciar en las figuras anteriores no existe presencia de SPM, por tanto, para distancias inferiores a 100km tampoco existe presencia de no linealidades, como se muestra en el anexo A, por lo que seguimos con el siguiente caso.

Caso 1.2:

Potencia del pulso: $P_0=10\text{mW}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.98$$

El resultado gráfico de las simulaciones en estas condiciones se muestra en la siguiente figura 2.19:

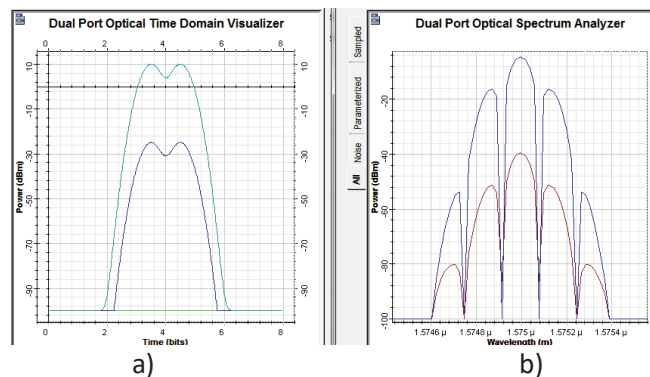


Figura 2.19 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En todos los casos no se presenta SPM esto se puede evidenciar en que la forma de la señal inicial y final no cambia, en el siguiente caso se aumenta la potencia drásticamente para observar el impacto de SPM.

Caso 1.3:

Potencia: 100mW

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.88$$

En la siguiente figura se puede observar como el pulso se ha comprimido, así pues en el gráfico de la izquierda se muestra la señal aplicada a la entrada de la fibra y en la derecha la señal resultante al recorrer toda la fibra.

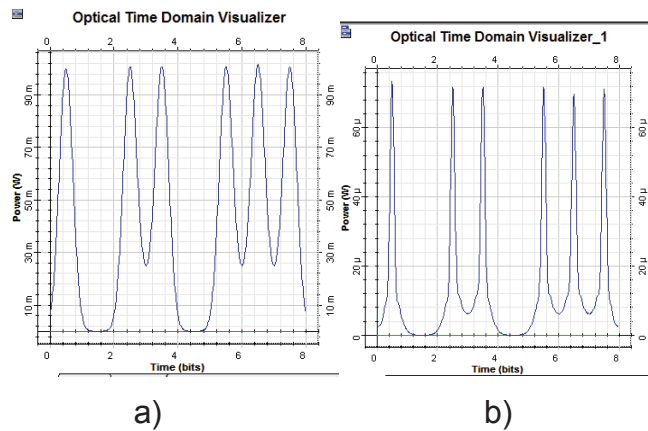


Figura 2.20 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$ a) señal inicial, b) señal resultante

Se puede apreciar una compresión del pulso en la figura 2.20 (b) respecto a el pulso inicial 2.20 (a). En la siguiente figura (2.21) se puede observar cómo ha cambiado la curva de la relación $\frac{T_L}{T_0}$.

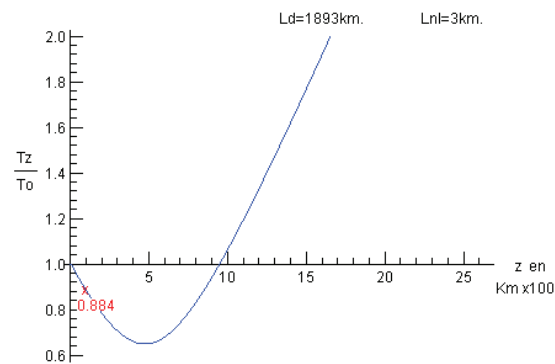


Figura 2.21 Resultado de la relación T_L/T_0 para 100km $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$

Para esta velocidad de transmisión y estas condiciones se puede observar que el aumento de potencia ocasiona una compresión inicial del pulso.

Sección 2:

En esta sección se considera una velocidad de transmisión mayor, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t= 20\text{ Gbps}$

Ancho del pulso $T_0= 25\text{ps}$

Distancia: $L=100\text{ km}$

Caso 2.1

Potencia del pulso: $P_0=1\text{mW}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1$$

En la siguiente figura se puede observar la forma de la señal antes de ser propagada por la fibra y después de haberse propagado por la misma.

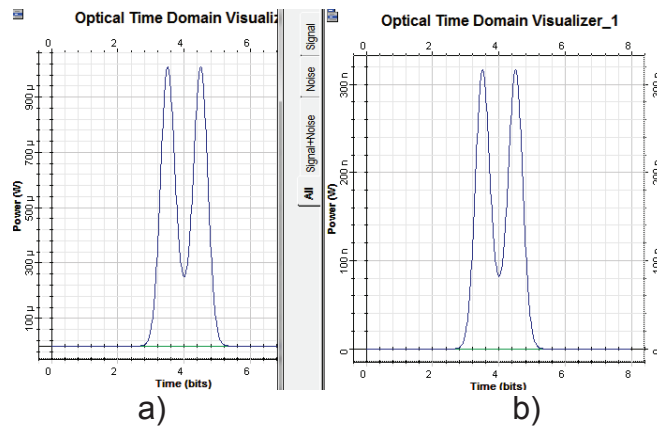


Figura 2. 22 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$, a) señal inicial, b) señal final

En la figura 2.22 no se observa presencia de SPM, la forma del pulso no ha cambiado en esta distancia por lo que para distancias menores tampoco existirán cambios no se presenta simulaciones para distancias mayores en esta sección con el objetivo de tener un punto de comparación, sin embargo en el ANEXO A si se considera distancias superiores.

Caso 2.2

Potencia del pulso: $P_0=10\text{mW}$.

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.98$$

En la siguiente figura se presenta el resultado de la simulación en estas condiciones, en esta ocasión se ha tomado una escala en decibelios tanto para la forma temporal como para el espectro de la señal para poder tener una mejor apreciación.

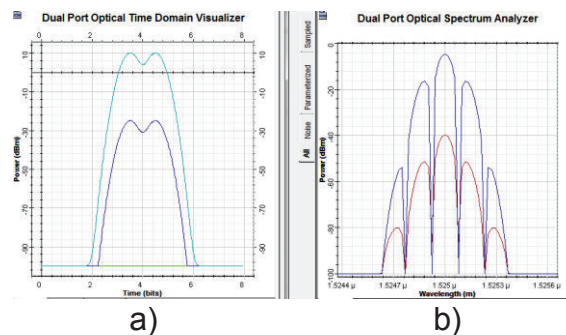


Figura 2. 23 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar en la figura 2.23 que no hay cambios en la forma de la señal tanto en su espectro como en su forma temporal.

Caso 2.3

Potencia del pulso: $P_0=40\text{mW}$.

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.84$$

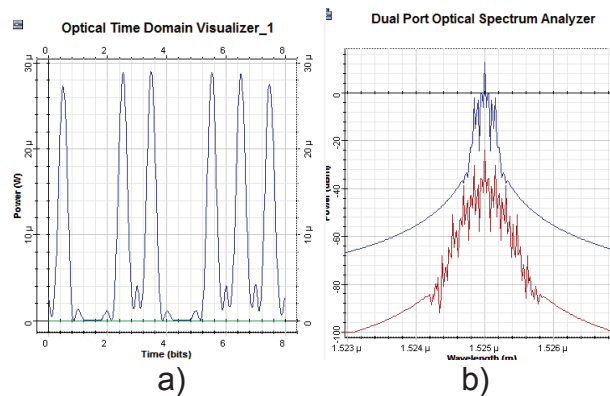


Figura 2. 24 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=40\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.24(a) se puede observar que existe una compresión temporal del pulso y en la figura 2.24(b) la aparición de nuevas componentes de frecuencia debido a SPM.

Caso 2.4:

Potencia del pulso: $P_0=100\text{mW}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.66$$

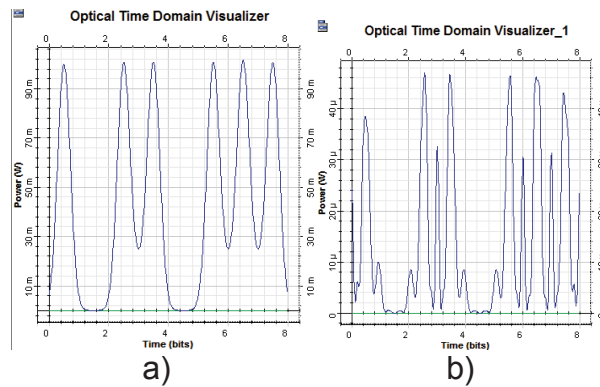


Figura 2. 25 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$ $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$. (a) señal inicial, (b) señal resultante

En este caso todavía es posible recuperar la señal, sin embargo puede apreciarse un cambio drástico en la forma del pulso.

Para poder entender por qué cambia la forma del espectro de un pulso, en la siguiente figura se muestra cómo es afectado un solo pulso con los mismos parámetros de transmisión.

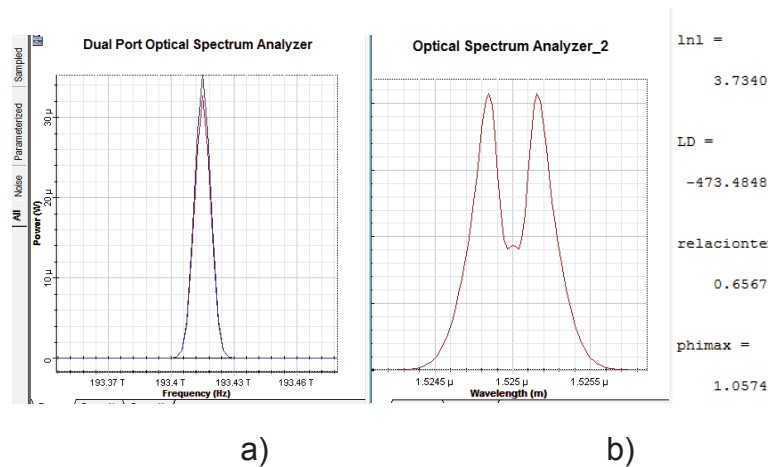


Figura 2. 26 Resultado de la simulación para un solo pulso para $L=100\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=100\text{mW}$, a) pulso inicial, b) pulso final

En la figura 2.26 se puede observar que la forma de un solo pulso ha cambiado, esto se debe a que como ha aumentado la potencia, el valor, de φ_{max} (en la figura se representa con el valor de phimax), en este caso es 1.05π , aumenta, y tal cómo se mostró en la figura 1.14 la forma del pulso cambia al aumentar el valor de dicho parámetro.

Sección 3

En esta sección se considera una velocidad de transmisión mayor con respecto a la sección 2 pero en cada caso se irá incrementando el alcance de la transmisión, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión= 40 Gbps.

Ancho del pulso $T_0 = 12.5\text{ps}$.

Potencia del pulso: $P_0=10\text{mW}$.

Caso 3.1

Distancia: $L=40\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.99$$

En la siguiente figura se presenta el resultado de la simulación en estas condiciones:

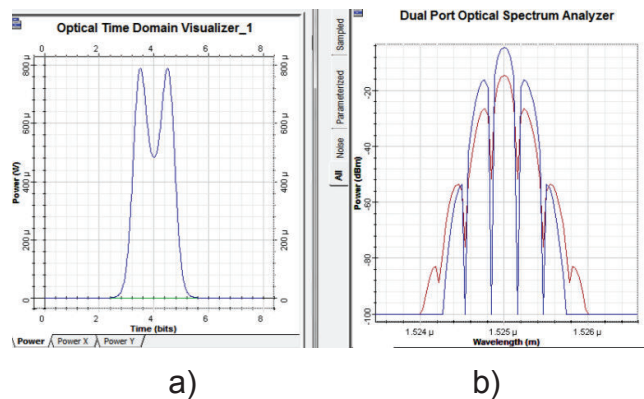


Figura 2. 27 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$ $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral

En estas condiciones no hay presencia de efectos no lineales como se aprecia en la figura 2.27.

Caso 3.2

Distancia: L=50 km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.01$$

En la siguiente figura se observa el resultado de la simulación:

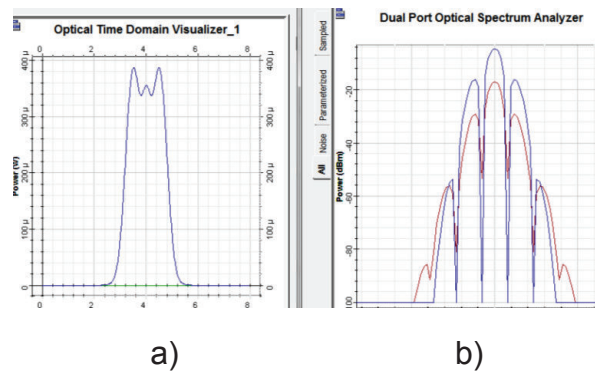


Figura 2. 28 Resultado de la simulación para L=50km, Vt= 40Gbps, P₀=10mW. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.28(a) se puede evidenciar que debido al ensanchamiento de los pulsos, la señal ha sufrido cambios en su forma.

Caso 3.3

Para este caso se aumenta levemente la distancia de transmisión para observar cómo varía el parámetro $\frac{T_L}{T_0}$ y la forma de la señal.

Distancia: L=60 km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.022$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

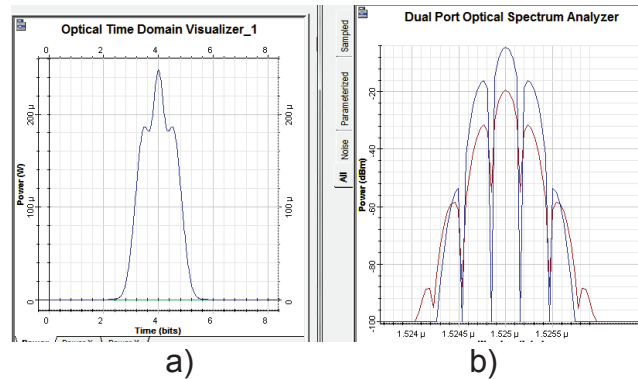


Figura 2. 29 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar en la figura 2.29 que para distancias mayores la forma del pulso de va degradando debido a los efectos lineales.

Sección 4

En esta sección se considera una menor potencia de transmisión con respecto a la sección anterior, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{ Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 12.5\text{ps}$

Potencia del pulso: $P_0=1\text{mW}$

La distancia considerada para cada caso de análisis fue obtenida del Anexo A, puesto que en estas condiciones ya se puede apreciar una degradación en la forma de la señal.

Caso 4.1

Distancia: $L=40\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.048$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

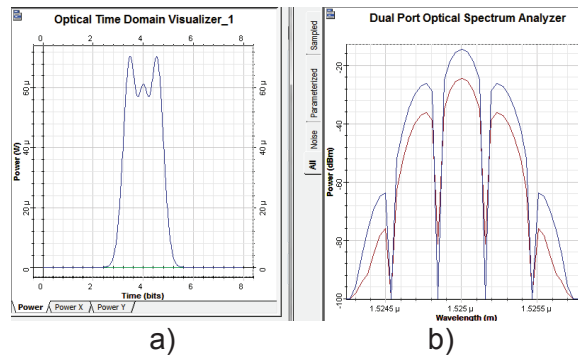


Figura 2. 30 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar en la figura 2.30 un mayor ensanchamiento de la señal, sin embargo aún no se presenta ISI en estas condiciones.

Caso 4.2

Distancia: $L=50\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.077$$

En la siguiente figura se ilustra el resultado de la simulación en estas condiciones:

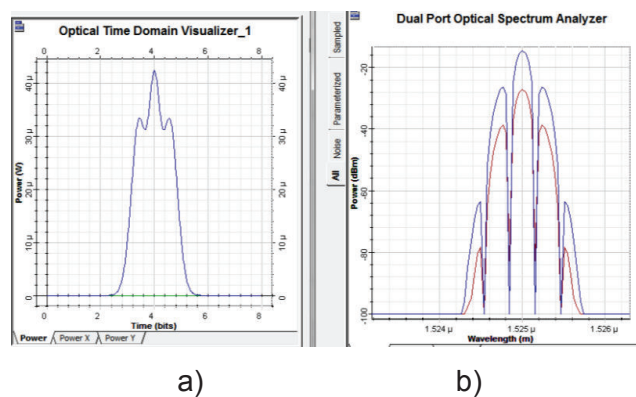


Figura 2. 31 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En estas condiciones aún es posible recuperar la señal, se puede observar que a mayor distancia la forma del pulso de va degradando debido a los efectos de SPM y GVD.

Sección 5

En esta sección se considera una velocidad de transmisión mayor con respecto a la sección anterior, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión 60 Gbps

Ancho del pulso $T_0 = 8\text{ps}$

Potencia del pulso: $P_0 = 10\text{mW}$

Caso 5.1

Distancia: $L = 21\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.01$$

En la siguiente figura se presenta el resultado de la simulación en estas condiciones:

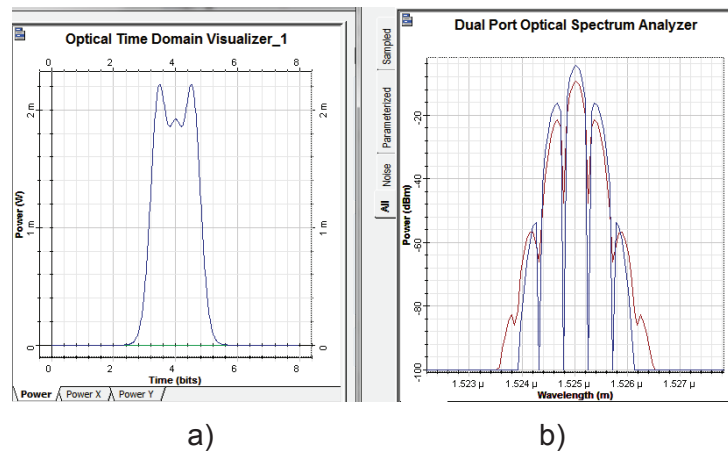


Figura 2. 32 Resultado de la simulación para $L=21\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar que los efectos no lineales empiezan a manifestarse por cuanto el espectro se ha ensanchado levemente.

Caso 5.2

Distancia: $L=30$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.05$$

En la siguiente figura se ilustra el resultado de la simulación en estas condiciones:

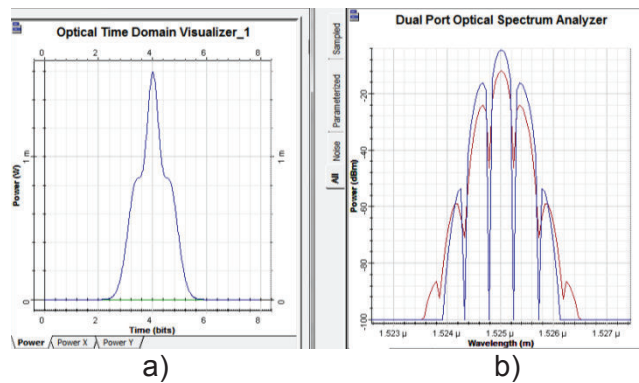


Figura 2. 33 Resultado de la simulación para $L=30$ km, $V_t= 60$ Gbps, $P_0=10$ mW. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar en la figura 2.33 que el impacto por SPM y GVD aumenta con la distancia.

Sección 6

En esta sección se considera una velocidad de transmisión mayor, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t= 80$ Gbps

Ancho del pulso: $T_0 = 6.25$ ps

Potencia del pulso: $P_0=1$ mW

Caso 6.1

Distancia: $L=10$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.05$$

En la siguiente figura se ilustra el resultado de la simulación en estas condiciones:

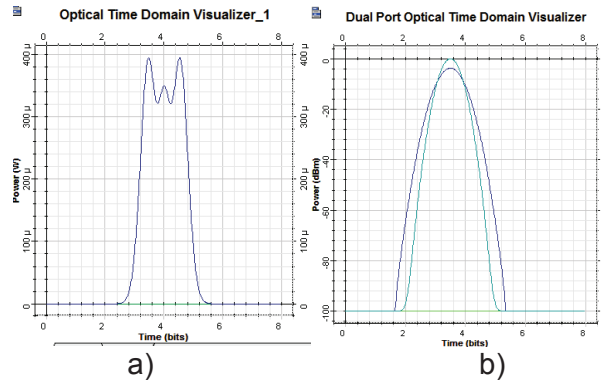


Figura 2. 34 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t=80\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar en la figura 2.34 que el impacto por SPM y GVD aumenta conforme aumenta la velocidad de transmisión para distancias menores.

Caso 9.2

Distancia: $L=15\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.14$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

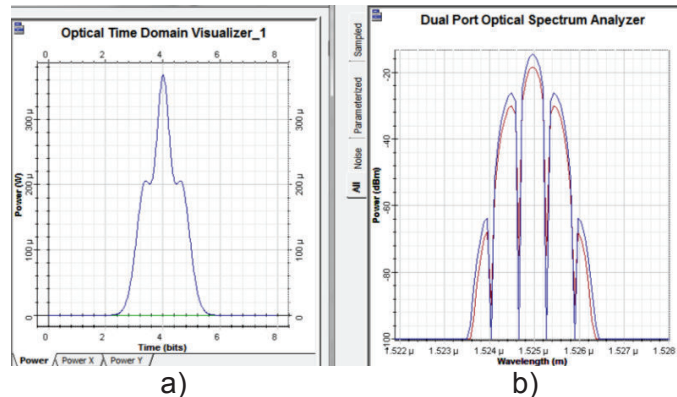


Figura 2. 35 Resultado de la simulación para $L=15\text{km}$, $V_t=80\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En esta figura se puede observar que en estas condiciones existe una deformación importante de la señal, esto se debe al ensanchamiento de la misma como resultado del impacto de los efectos no lineales.

Sección 7

En esta sección se considera una velocidad de transmisión mayor, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t = 100$ Gbps

Ancho del pulso: $T_0 = 5$ ps

Potencia del pulso: $P_0 = 1$ mW

Caso 7.1

Distancia: $L = 5$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.03$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

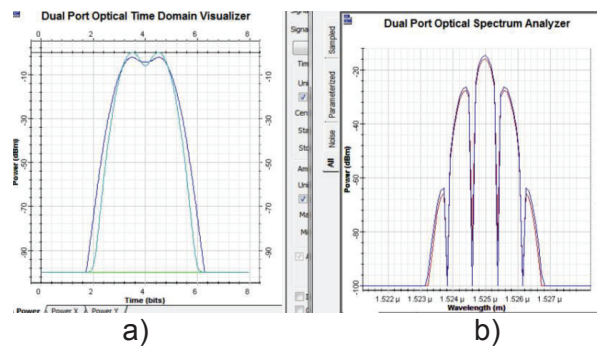


Figura 2. 36 Resultado de la simulación para $L=5$ km, $V_t= 100$ Gbps, $P_0=1$ mW. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar en la figura 2.36 que el impacto por SPM y GVD aumenta, conforme aumenta la velocidad de transmisión la distancia a la que estos fenómenos empiezan a manifestarse es menor.

Caso 7.2

Distancia: L=6 km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.046$$

Se puede observar en la figura 2.37 que el impacto por SPM y GVD aumenta, en estas condiciones el impacto de las no linealidades no es muy significativo sin embargo ya empiezan a manifestarse, la forma del espectro no se ha modificado esto se debe a la pequeña potencia utilizada.

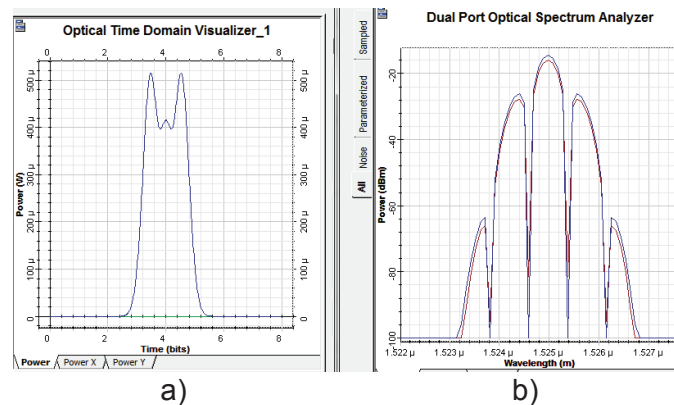


Figura 2. 37 Resultado de la simulación para L=6km, Vt= 100Gbps, P₀=1mW. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

El siguiente caso se analizará en una distancia ligeramente mayor, con los mismos parámetros de transmisión.

Caso 7.3

Distancia: L=8 km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.1$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

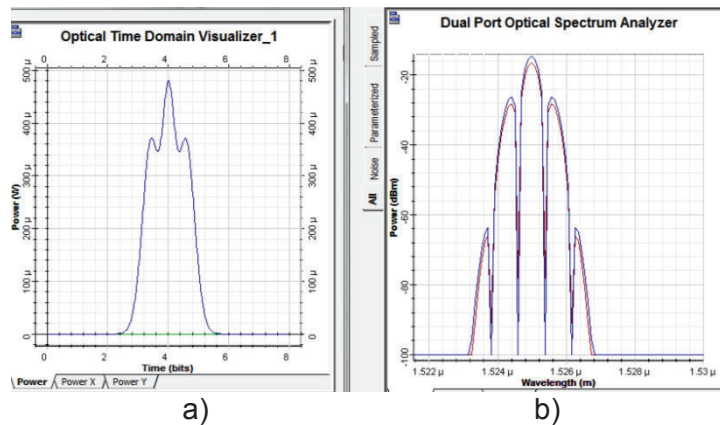


Figura 2. 38 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t=100\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar en la figura 2.38 que el impacto por SPM y GVD aumenta con respecto al caso anterior.

Caso 7.4

Distancia: $L=50\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 3.5$$

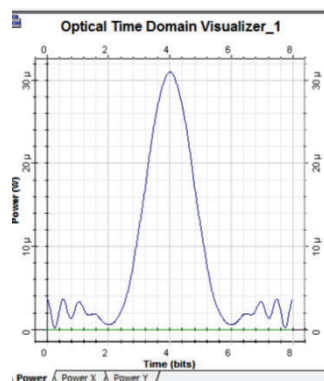


Figura 2. 39 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t=100\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$

En la figura 2.39 se puede observar cómo se ha degradado la señal en una distancia de 50km, esto se debe a una relación $\frac{T_L}{T_0}$ muy elevada, lo cual implica un ensanchamiento pronunciado de la señal.

2.3.1.2 Simulaciones de SPM para la longitud de onda de 1575nm

Para las siguientes secciones se consideran las características de esta fibra en la longitud de onda 1575nm, el valor de β_2 cambia a $-3.95\text{ps}^2/\text{Km}$, este valor ha sido calculado con [22] y corresponde al valor de dispersión $3\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{Km}$ [15].

Sección 1:

Parámetros generales para la primera sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t = 10\text{ Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0 = 50\text{ps}$

Potencia del pulso: $P_0 = 1\text{mW}$

Caso 1.1:

Distancia: $L = 1\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

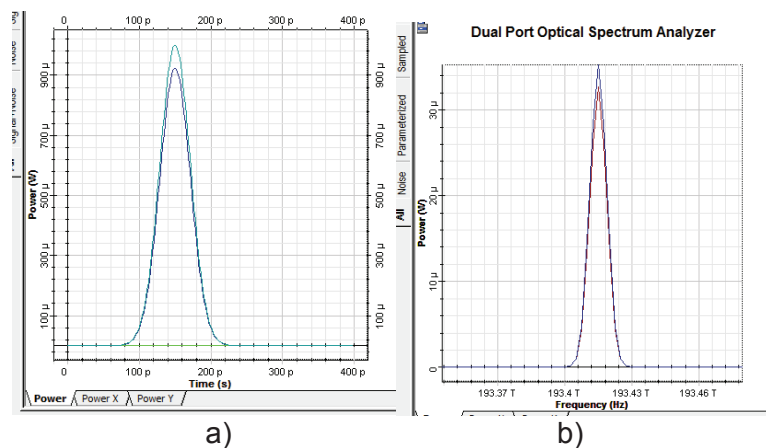


Figura 2. 40 Resultado de la simulación para $L=1\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.40 se puede observar que no existe presencia de no linealidades, por lo que no hay deformación en la forma del pulso.

Caso 1.2:

Distancia: $L=100$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.015$$

En la siguiente figura presenta observar el resultado de la simulación en estas condiciones:

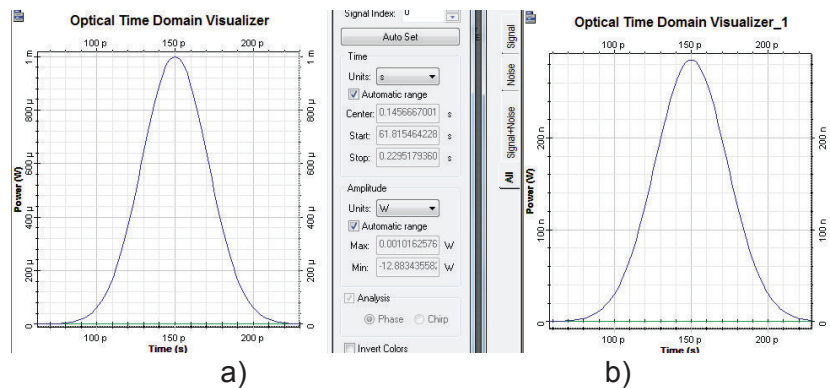


Figura 2.41 Resultado de la simulación para $L=100$ km, $V_t= 10$ Gbps, $P_0=1$ mW. (a) Señal inicial, (b) señal resultante.

Siendo la imagen de la izquierda la señal entrante y la de la derecha la resultante al final de la fibra, se puede observar que no existe un ensanchamiento y el mayor efecto en estas condiciones es el de la atenuación.

Con este resultado procedemos a pasar a la siguiente sección donde aumentamos la potencia de transmisión a 5mW.

Sección 2:

En esta sección se considera una potencia de transmisión mayor, con respecto a la sección anterior, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t = 10$ Gbps

Ancho del pulso: $T_0 = 50$ ps

Potencia del pulso: $P_0 = 5$ mW

Distancia: $L = 100$ km

En estas condiciones tenemos:

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.998$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

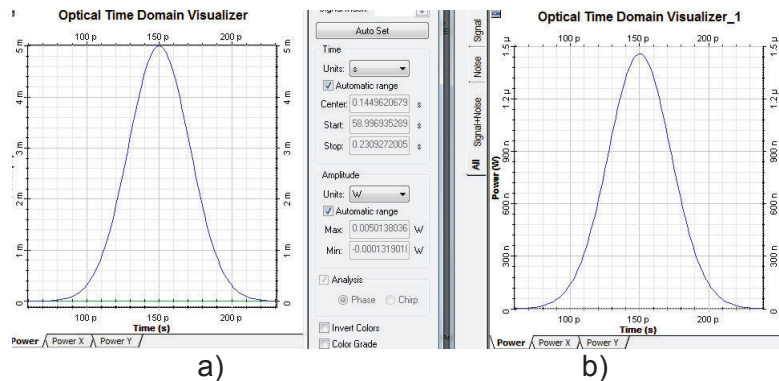


Figura 2.42 Resultado de la simulación para $L = 100$ km, $V_t = 10$ Gbps, $P_0 = 5$ mW. (a) Señal inicial, (b) señal resultante.

En estas condiciones con una potencia de 5 mW no se presenta SPM y el fenómeno con mayor impacto observable es el de la atenuación, por lo tanto se puede concluir que en estas condiciones no existen problemas de SPM hasta los 100 km.

Sección 3:

En esta sección se considera una potencia de transmisión aún mayor, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t = 10$ Gbps

Ancho del pulso: $T_0 = 50$ ps

Potencia del pulso: $P_0 = 10$ mW

Caso 3.1:

Distancia: $L=1$ km

En estas condiciones tenemos:

$$\frac{T_L}{T_0} = 1$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

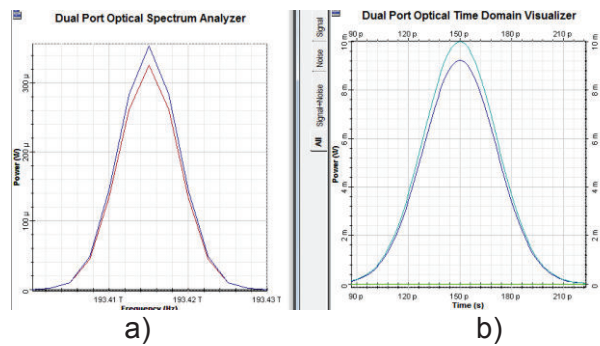


Figura 2. 43 Resultado de la simulación para $L=1$ km, $V_t= 10$ Gbps, $P_0=10$ mW. (a) forma espectral, (b) forma temporal.

En la figura 2.43 se puede evidenciar que no existe alteración en la forma del pulso, es importante notar que para esta potencia de transmisión la curva $\frac{T_L}{T_0}$ ha cambiado de la siguiente manera:

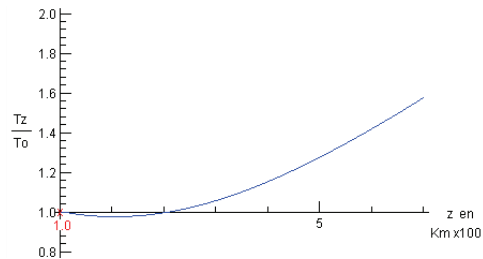


Figura 2. 44 Gráfico de la relación $\frac{T_L}{T_0}$ para $L=1$ km, $V_t= 10$ Gbps, $P_0=10$ mW

En la figura 2.44 se puede observar que existe una región donde el pulso se comprime, esta región se encuentra entre los valores de 0 y 1 en el eje “Y”.

Caso 3.2:

Distancia: $L=100$ km.

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.976$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

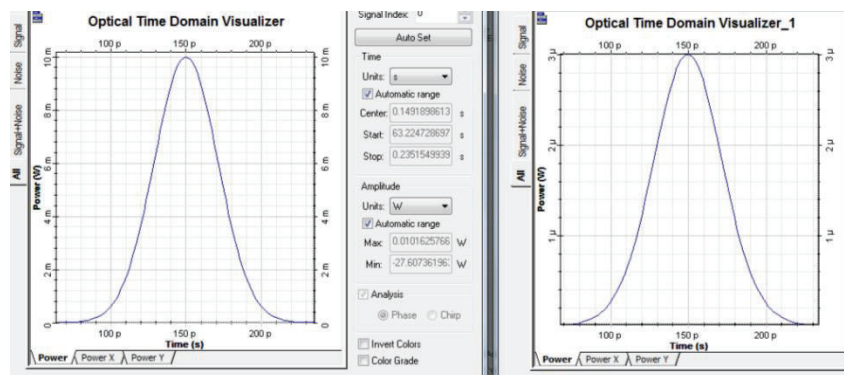


Figura 2. 45 Resultado de la simulación para $L=100$ km, $V_t= 10$ Gbps, $P_0=10$ mW

Se puede observar que no existe alteración en la forma del pulso en estas condiciones.

Sección 4:

Para esta nueva sección se aumentará la velocidad de transmisión a 20Gbps, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t= 20$ Gbps

Ancho del pulso: $T_0 = 25$ ps

Potencia del pulso: $P_0= 1$ mW

Caso 4.1

Distancia: $L=50$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.057$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

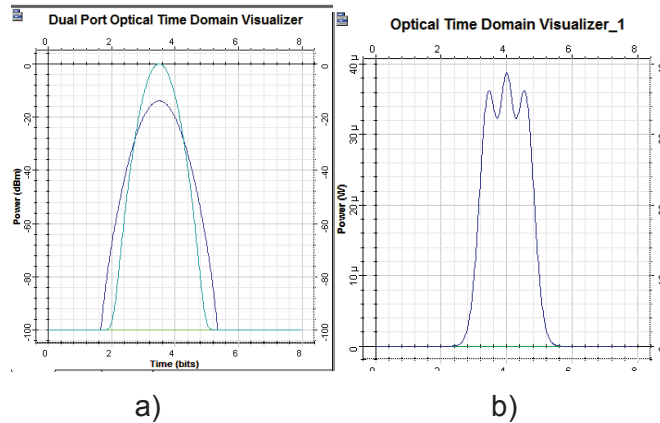


Figura 2. 46 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. a) Para un solo pulso, b) para dos pulsos.

En la imagen se puede observar como un pulso en estas condiciones es ensanchado (a); y, en la imagen (b) se puede observar el impacto de este ensanchamiento en dos pulsos consecutivos.

Caso 4.2:

Distancia: $L=100\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.22$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

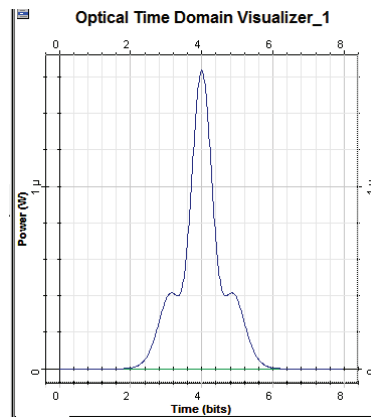


Figura 2. 47 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$

En la figura 2.47 se puede notar un impacto grande de los efectos no lineales en el pulso de llegada, siendo el ensanchamiento del 22% aproximadamente.

Sección 5:

Para esta nueva sección se aumentará la potencia de transmisión con respecto a la sección anterior, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t= 20 \text{ Gbps}$

Ancho del pulso = 25ps

Potencia del pulso: $P_0=5\text{mW}$

Caso 5.1:

Distancia: $L=50 \text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.015$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

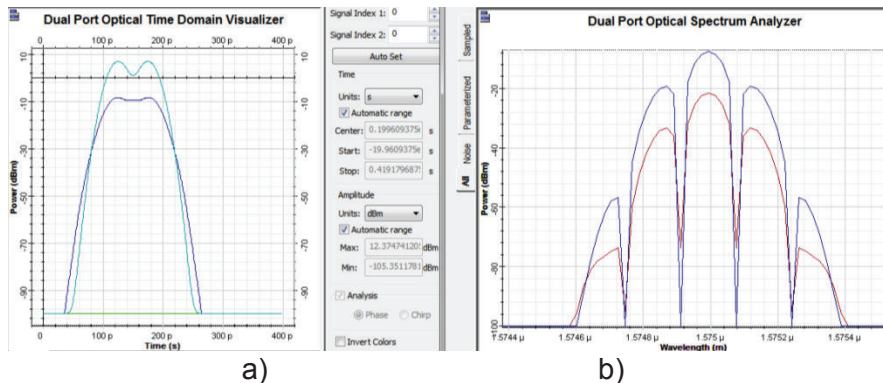


Figura 2. 48 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.48, se puede observar claramente que aumentando la potencia con la misma distancia de transmisión los efectos no lineales se reducen, esto es gracias a que estamos trabajando en el régimen anormal.

Caso 5.2

Distancia: $L=60\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.028$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

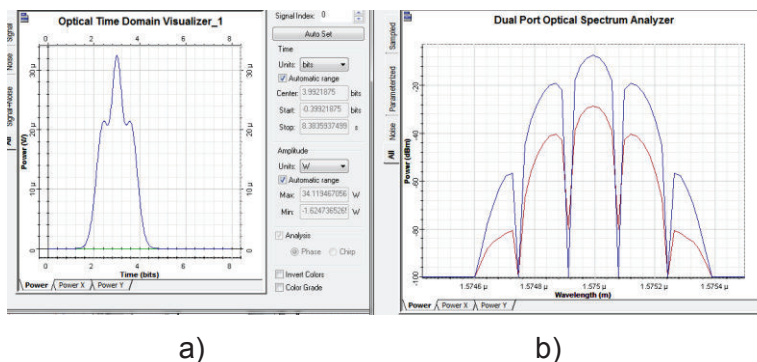


Figura 2. 49 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.49(a), se puede observar claramente que ya existe una deformación de la señal.

Sección 6:

Para esta nueva sección se aumentará aún más la potencia de transmisión, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t = 20$ Gbps

Ancho del pulso $T_0 = 25$ ps

Potencia del pulso: $P_0 = 10$ mW

Caso 6.1

Distancia: $L = 55$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.04$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

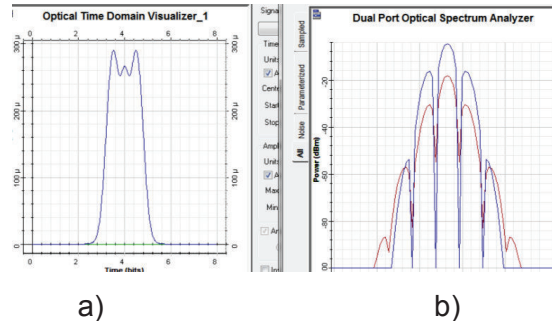


Figura 2. 50 Resultado de la simulación para $L = 55$ km, $V_t = 20$ Gbps, $P_0 = 10$ mW. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.50 se puede observar que en estas condiciones los efectos no lineales empiezan a tomar importancia.

Caso 6.2

Distancia: $L = 60$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.1$$

En la figura 2.51(a) se puede observar claramente que ya existe una deformación de la señal.

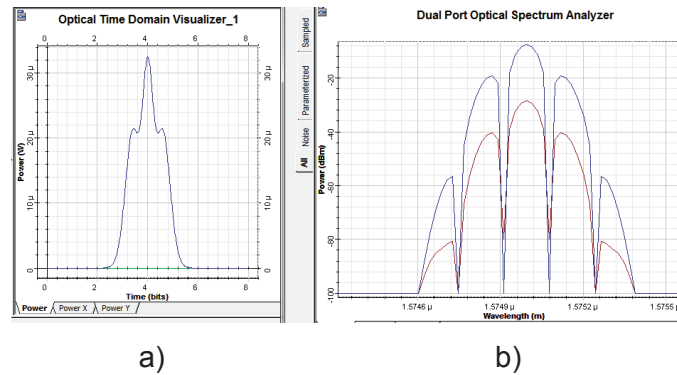


Figura 2. 51 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t=20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Esta figura se puede apreciar como se ha degradado la señal, comparando con la sección 1 se puede observar que esta degradación ocurre a distancias menores esto se debe al aumento de la velocidad de transmisión.

Sección 7:

Para esta nueva sección se aumentará la velocidad de transmisión, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t=40\text{ Gbps}$

Ancho del pulso = 12.5ps

Potencia del pulso: $P_0=1\text{mW}$

Caso 7.1:

Distancia: $L=10\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.039$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

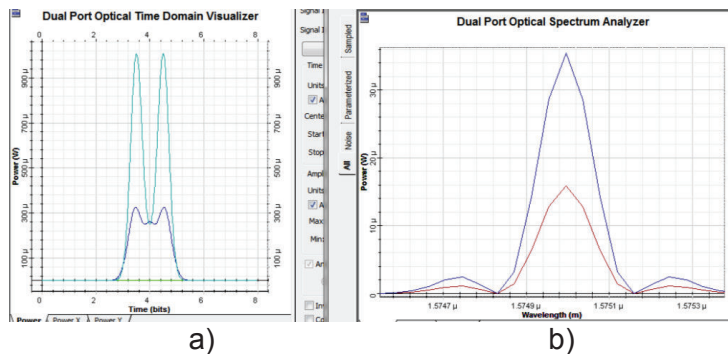


Figura 2. 52 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.52 se puede observar claramente como se modifica la forma de la señal por efecto de SPM y GVD.

Caso 7.2

Distancia: $L=20\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.15$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

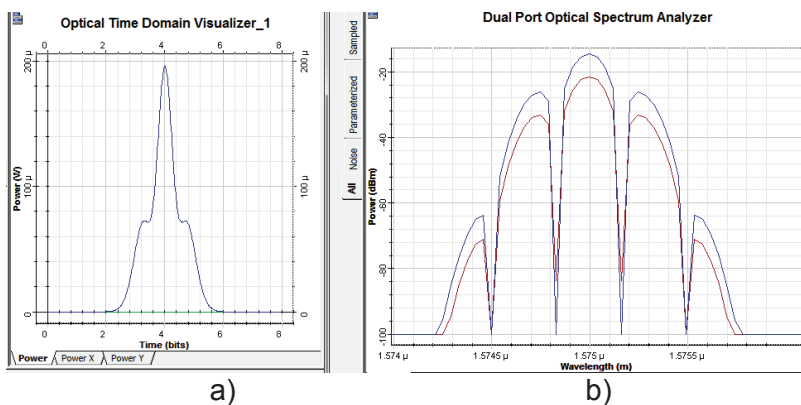


Figura 2. 53 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

Se puede observar un ensanchamiento del pulso inicial, en el espectro se muestra como una reducción del mismo, en una distancia de 20km, esto indica que el

fenómeno de SPM ya toma una mayor importancia y sus efectos son más significativos en sistemas con velocidades de transmisión altas.

Caso 7.3:

Distancia: $L=40\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.50$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

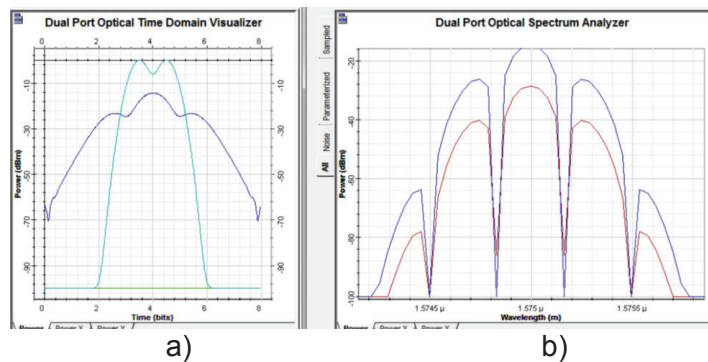


Figura 2. 54 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.54 se puede observar una deformación considerable de la señal por efectos de ensanchamiento de los pulsos.

Caso 7.4:

Distancia: $L=50\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.76$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

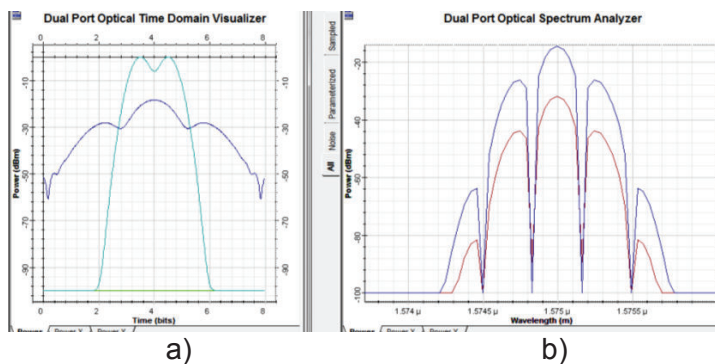


Figura 2. 55 Resultado de la simulación para $L=50\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En estas condiciones se puede observar una señal degradada en el régimen temporal, esto se debe a la alta velocidad de transmisión frente a la distancia.

Caso 7.5:

Distancia 70km

$$\frac{T_L}{T_0} = 2.4$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

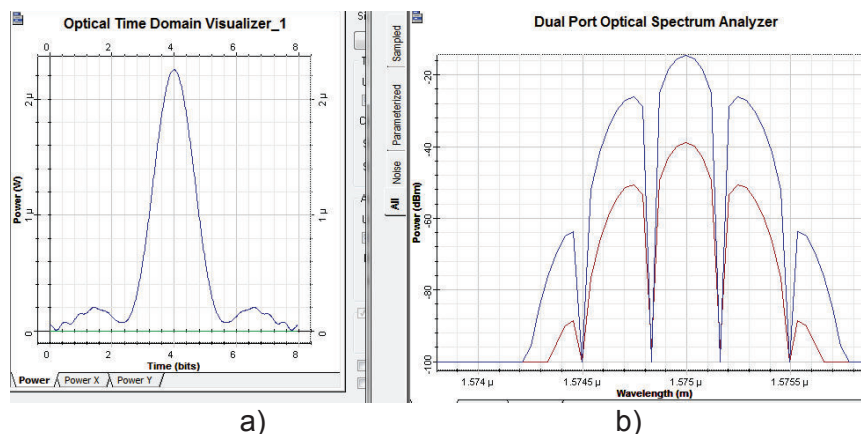


Figura 2. 56 Resultado de la simulación para $L=70\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En esta figura se puede observar que existe una gran degradación en la forma de la señal; como la potencia no es muy elevada la forma del espectro no ha cambiado mucho en lo que a SPM se refiere.

Caso 7.6:

Distancia: $L=100\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 3.3$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones.

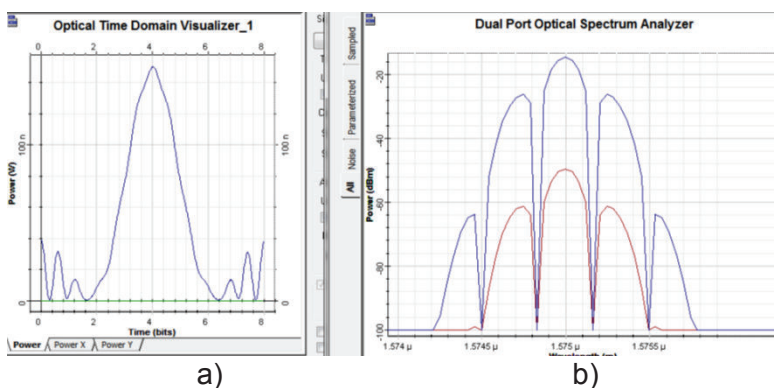


Figura 2.57 Resultado de la simulación para $L=100\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.57 se puede observar una situación en la cual la señal ya es irreconocible, en ensanchamiento de la señal ha ocasionado que los pulsos se superpongan como se observa en la figura 2.57(a) (recordando que la señal inicial se observa en la figura 2.22..

Sección 8

Para esta nueva sección se aumentará la velocidad de transmisión y en cada caso se variará la distancia, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t=40\text{ Gbps}$

Ancho del pulso $T_0=12.5\text{ps}$

Potencia del pulso: $P_0 = 5\text{mW}$

Caso 8.1:

Distancia: $L = 10\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.024$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

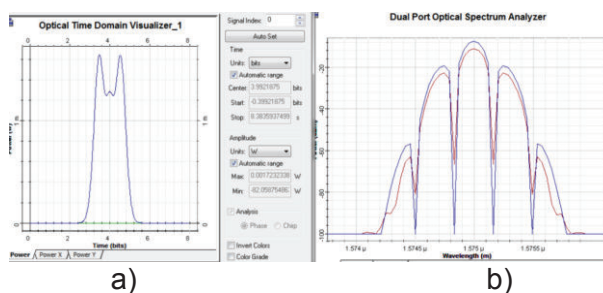


Figura 2. 58 Resultado de la simulación para $L = 10\text{km}$, $V_t = 40\text{Gbps}$, $P_0 = 5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.58 se puede observar que existe un ensanchamiento de los pulsos.

Caso 8.2:

Distancia: $L = 20\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.13$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación:

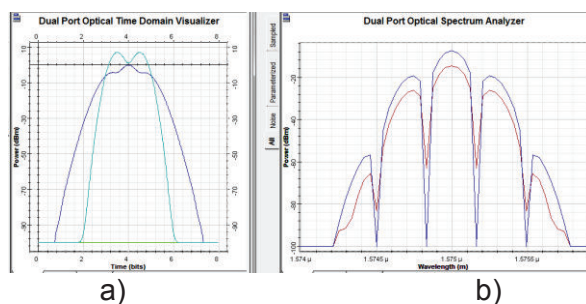


Figura 2. 59 Resultado de la simulación para $L = 20\text{km}$, $V_t = 40\text{Gbps}$, $P_0 = 5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.59 se puede observar que existe un ensanchamiento de los pulsos considerable.

Caso 8.3:

Distancia: $L=40\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.41$$

En la siguiente figura 2.60 se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

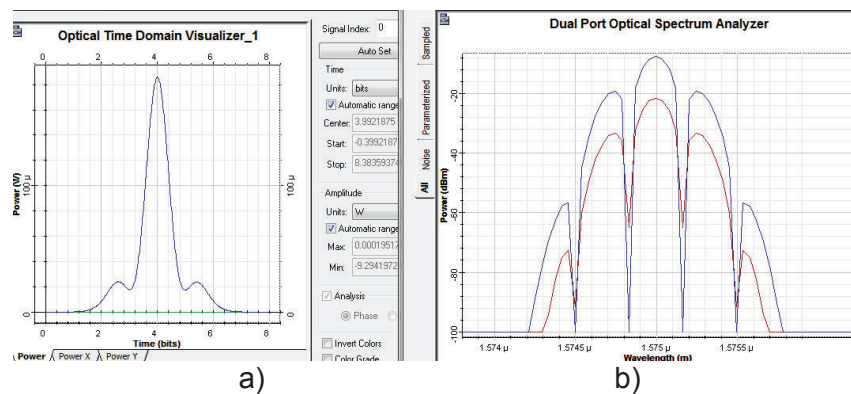


Figura 2. 60 Resultado de la simulación para $L=40\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=5\text{mW}$. (a) forma temporal, (b) forma espectral.

En esta figura se puede observar un ensanchamiento de los pulsos considerable y la forma de la señal ha sido modificada en gran medida.

Sección 9:

Para esta nueva sección se aumentará la potencia de transmisión, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t=40\text{ Gbps}$

Ancho del pulso $T_0= 12.5\text{ps}$

Potencia del pulso: $P_0= 10\text{mW}$

Caso 9.1:

Distancia: $L=10\text{km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.009$$

En la figura 2.61(a) se puede observar que existe un ensanchamiento de los pulsos muy leve porque no existe una deformación significativa de la señal.

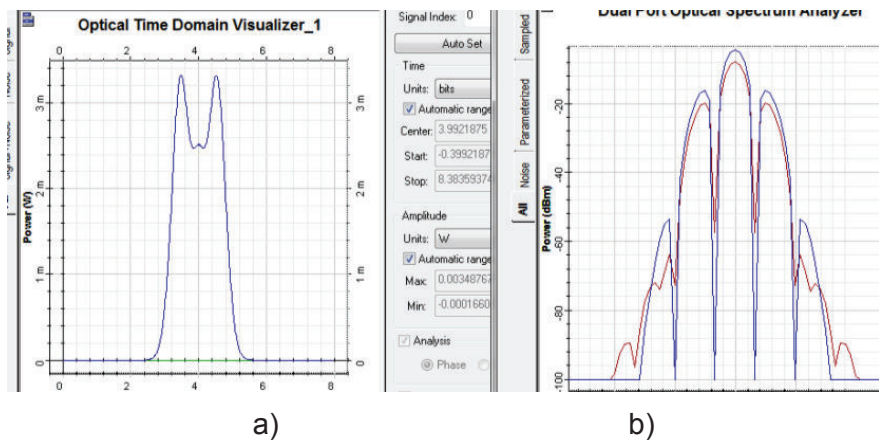


Figura 2. 61 resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

Caso 9.2:

Distancia: $L=12\text{km}$

En este caso se ha considerado una distancia ligeramente mayor a la del caso anterior para observar cómo varía la forma de los pulsos a velocidades altas de transmisión en pequeñas variaciones de distancia.

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.014$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

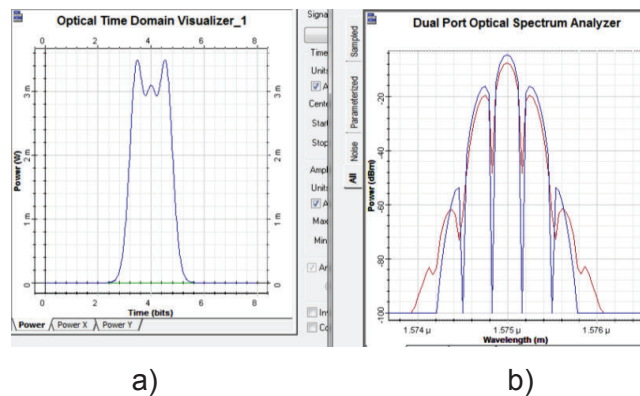


Figura 2. 62 Resultado de la simulación para $L=10\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.62 se puede observar que el ensanchamiento de pulsos es mayor, sin embargo no presenta problemas en la transmisión.

Sección 10:

Para esta nueva sección se aumentará la velocidad de transmisión, los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t=60\text{ Gbps}$

Ancho del pulso $T_0=8.3\text{ps}$

Potencia del pulso: $P_0=1\text{mW}$

Caso 10.1:

En este caso se considera una distancia muy pequeña para poder realizar la comparación con distancias mayores, este análisis se lo realiza por la alta velocidad de transmisión que se utiliza y es esperado que haya distorsiones en distancias pequeñas.

Distancia: $L=1\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.002$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

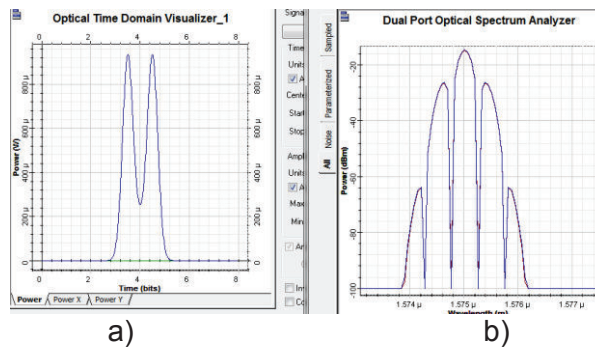


Figura 2. 63 Resultado de la simulación para $L=1\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.63 se puede observar que la señal no ha sido alterada de ninguna forma.

Caso 10.2:

Distancia: $L=5\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.049$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

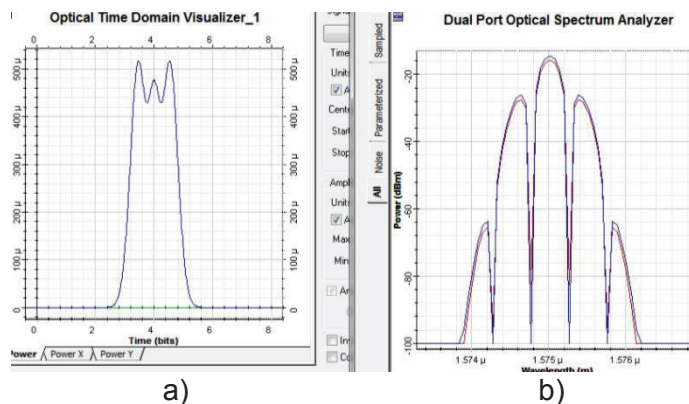


Figura 2. 64 Resultado de la simulación para $L=5\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.64 se puede observar que el ensanchamiento de pulsos es mayor, sin embargo con ese nivel de ensanchamiento no se presentan problemas en la transmisión.

Caso 10.3:

Distancia: $L=6$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.07$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

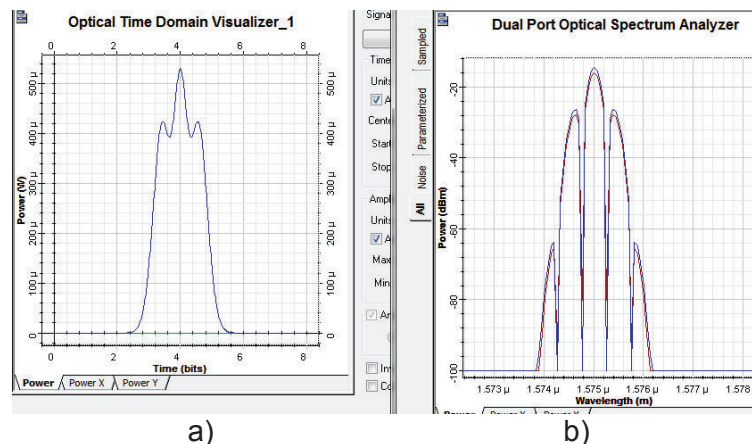


Figura 2. 65 Resultado de la simulación para $L=6$ km, $V_t= 60$ Gbps, $P_0=1$ mW. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.65 se puede observar que al aumentar la distancia de transmisión los efectos de SPM y GVD aumentan.

Sección 11:

En esta sección de casos se incrementará la potencia con relación a la vista en la sección anterior. Los parámetros generales para esta sección de casos son:

Velocidad de transmisión: $V_t= 60$ Gbps

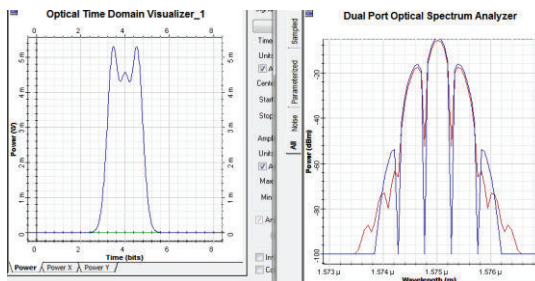
Potencia del pulso: $P_0=10$ mW

Caso 11.1:

Distancia: $L=5$ km

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.034$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:



a)

b)

Figura 2.66 Resultado de la simulación para $L=5\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

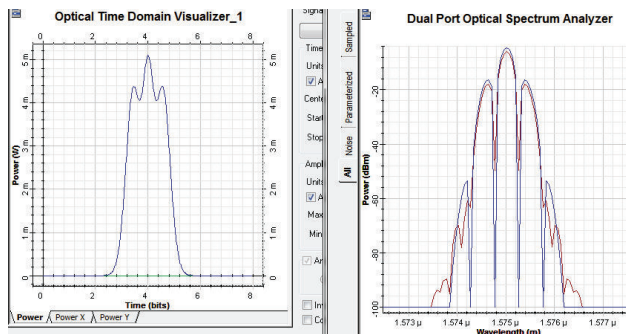
En la figura 2.66 se puede observar que existe un ensanchamiento de los pulsos.

Caso 11.2:

Distancia: $L=6\text{ km}$

$$\frac{T_L}{T_0} = 1.05$$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación:



a)

b)

Figura 2.67 Resultado de la simulación para $L=6\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.67, se puede observar claramente que ya existe una deformación de la señal.

2.3.2 SIMULACIONES PARA LA FIBRA G.655 C

Para este tipo de fibra solo se verán los casos más relevantes puesto que en la fibra G653 se vio en detalle la evolución del pulso para distintos escenarios, los únicos parámetros significativos que cambian en esta fibra con respecto a la anterior es la dispersión cromática y el área afectiva.

En el anexo A se puede observar el resumen de todas las simulaciones realizadas para la fibra G.655. Como se mostró en la figura 1.25 esta categoría de fibra puede tener dos valores de dispersión por lo que se subdividirá esta sección en dos partes, una con dispersión positiva y otra con dispersión negativa.

Para todos los casos se considera la siguiente señal inicial:

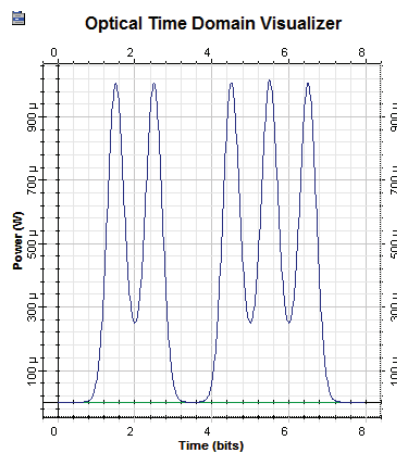


Figura 2. 68 Forma de la señal inicial para la simulación en fibra G.655

Esta figura corresponde a la siguiente señal binaria: 0110111, se ha tomado este patrón para observar el comportamiento de los pulsos adyacentes en una transmisión.

2.3.2.1 Simulaciones para la longitud de onda de 1530nm

Se ha escogido esta longitud de onda por presentar el menor coeficiente de dispersión.

Sección 1

Los parámetros generales para esta sección son:

$$\beta_2 = -1.32 \text{ ps}^2/\text{Km} [22]$$

Longitud de onda: $\lambda = 1530\text{nm}$

Caso 1.1

Potencia de transmisión: $P_0 = 1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t = 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0 = 12.5\text{ps}$

Distancia: $L = 39\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

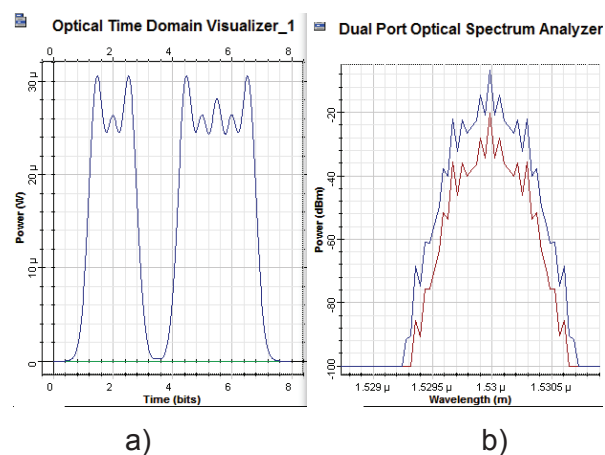


Figura 2. 69 Resultado de la simulación para $L=39\text{km}$, $V_t = 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.69 se puede evidenciar cómo cambia la forma de la señal en estas condiciones en relación a la señal de la figura 2.68.

Caso 1.2

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Distancia: $L=44\text{km}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 12.5\text{ps}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

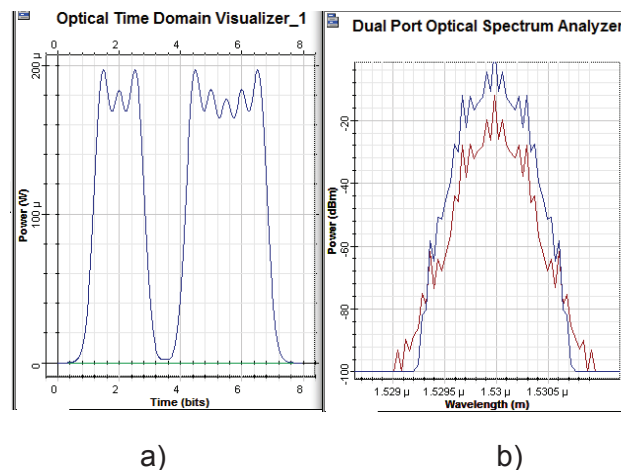


Figura 2. 70 Resultado de la simulación para $L=44\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.70 se puede observar que existe un mayor ensanchamiento de los pulsos, por tanto el cambio de forma de la señal aumenta.

Caso 1.3

Potencia de transmisión: $P_0=1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 8.33\text{ps}$

Distancia: $L=17\text{km}$

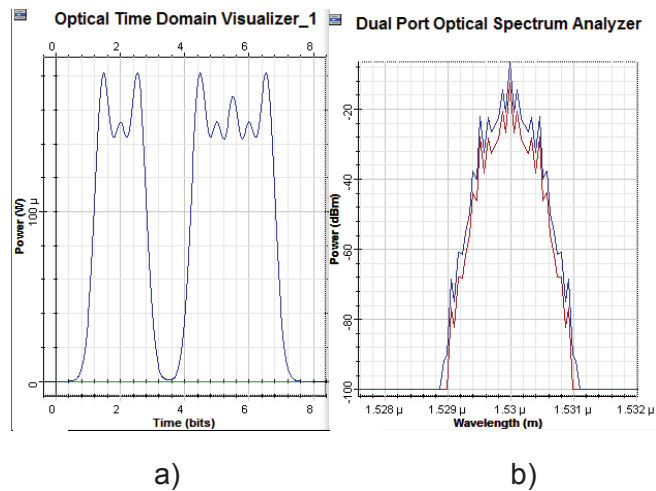


Figura 2. 71 Resultado de la simulación para $L=17\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

Caso 1.4

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t=60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0=8.33\text{ps}$

Distancia: $L=19\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

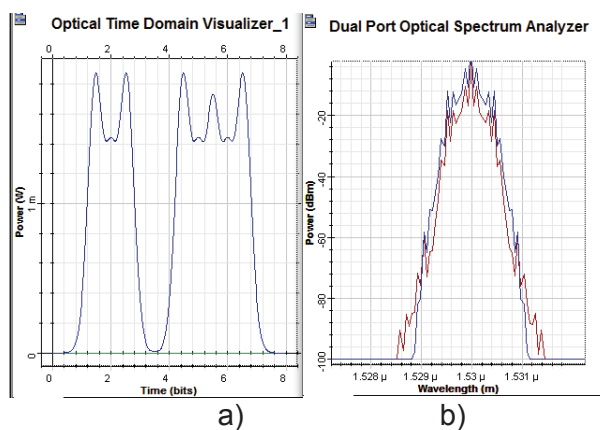


Figura 2. 72 Resultado de la simulación para $L=19\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.72 se puede observar que los efectos de SPM y GVD son mínimos.

Caso 1.5

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 100\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 5\text{ps}$

Distancia: $L=6\text{km}$

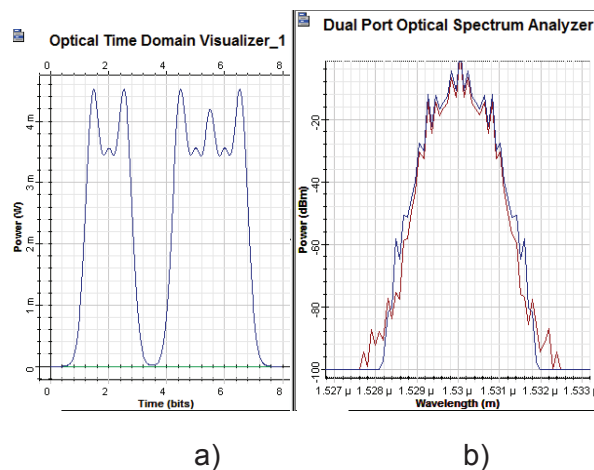


Figura 2.73 Resultado de la simulación para $L=6\text{km}$, $V_t= 100\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.73 se puede observar que los efectos de SPM y GVD han aumentado levemente.

Sección 2

En esta sección se analizará el régimen de dispersión positiva. Los parámetros generales para esta sección son:

$$\beta_2 = +1.32 \text{ ps}^2/\text{Km} [22]$$

Longitud de onda: $\lambda= 1530\text{nm}$

Caso 2.1

Potencia de transmisión: $P_0=1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0 = 12.5\text{ps}$

Distancia: $L = 37\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

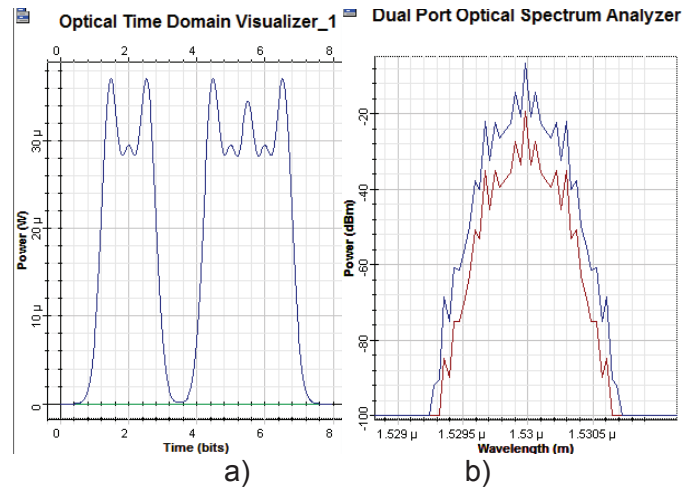


Figura 2. 74 Resultado de la simulación para $L = 37\text{km}$, $V_t = 40\text{Gbps}$, $P_0 = 1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.74 se puede observar que los efectos de SPM y GVD han aumentado levemente.

Caso 2.2

Potencia de transmisión: $P_0 = 10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t = 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0 = 12.5\text{ps}$

Distancia: $L = 36\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

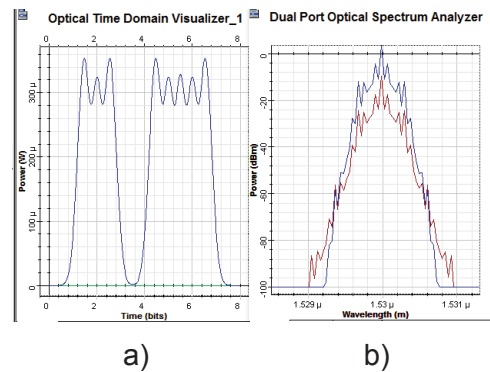


Figura 2. 75 Resultado de la simulación para $L=36\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.75 se puede observar que los efectos de SPM y GVD han aumentado considerablemente, sin embargo todavía se pueden reconocer cada uno de los pulsos.

Caso 2.3

Potencia de transmisión: $P_0=1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 8.33\text{ps}$

Distancia: $L=16\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación:

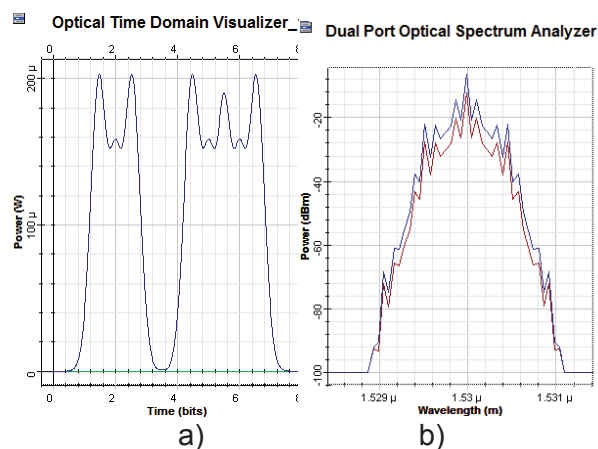


Figura 2. 76 Resultado de la simulación para $L=36\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.76 se puede observar que los efectos de SPM y GVD en estas condiciones son mínimos.

Caso 2.4

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 8.33\text{ps}$

Distancia: $L=15\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

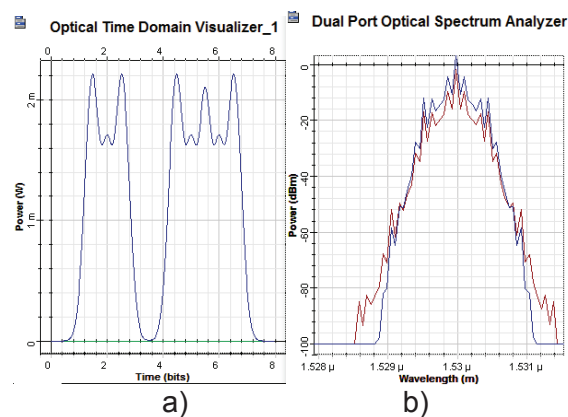


Figura 2. 77 Resultado de la simulación para $L=15\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.77 se puede observar que los efectos de SPM y GVD en estas condiciones son mínimos. También se observa que para el régimen de dispersión positivo el aumento de potencia conlleva a que el pulso se ensanche a distancias menores, caso contrario del que ocurre en el régimen de dispersión negativo.

Caso 2.5

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Para este caso se considera una velocidad de 100Gbps , por lo que la distancia a que los efectos no lineales se manifiestan es menor.

Velocidad de transmisión: $V_t = 100\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0 = 5\text{ps}$

Distancia: $L = 5\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

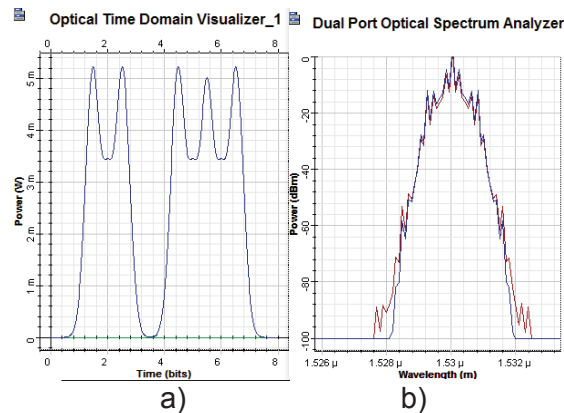


Figura 2.78 Resultado de la simulación para $L=5\text{km}$, $V_t = 100\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.78 se puede observar que no existe degradación de la señal en estas condiciones, siendo este el caso más crítico de transmisión por la alta velocidad de transmisión utilizada.

2.3.2.2 Simulaciones para la longitud de onda 1550nm

Para este tipo de fibra en esta longitud de onda el parámetro de dispersión cromática tiene un valor diferente al anteriormente visto, se realizan simulaciones en esta longitud de onda debido a que el valor de dispersión cromática tiene un valor intermedio entre el valor máximo y mínimo:

Sección 1

Para esta sección se consideran los siguientes parámetros generales

$$\beta_2 = -6.38 \text{ ps}^2/\text{Km}$$

Longitud de onda: $\lambda = 1550\text{nm}$

Caso 1.1

Potencia de transmisión: $P_0=1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 20\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 25\text{ps}$

Distancia: $L=32\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

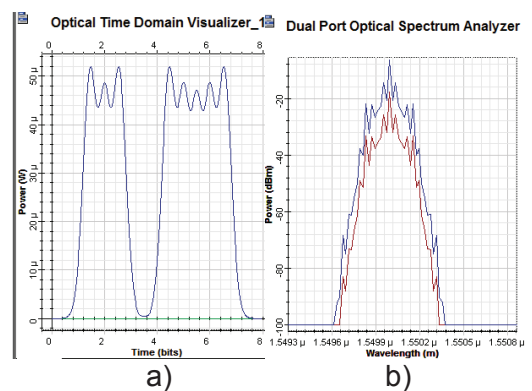


Figura 2. 79 Resultado de la simulación para $L=32\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.79 se puede observar cómo han evolucionado los pulsos luego de haberse propagado una distancia de 32km, tanto temporalmente como espectralmente.

Caso 1.2

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 20\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 25\text{ps}$

Distancia: $L=35\text{km}$.

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

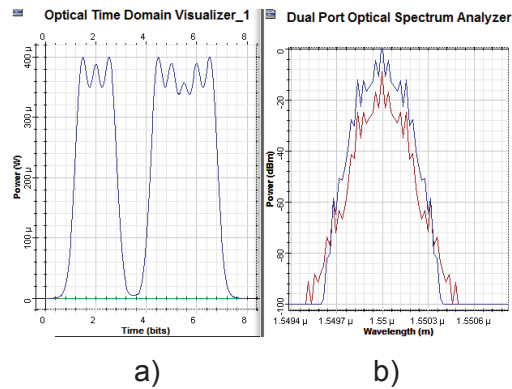


Figura 2. 80 Resultado de la simulación para $L=35\text{km}$, $V_t=20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.80 se puede observar cómo han evolucionado los pulso luego de haberse propagado una distancia de 35km, tanto temporalmente como espectralmente, se puede notar que en comparación con el caso anterior no existe mucha diferencia.

Caso 1.3

Potencia de transmisión: $P_0=1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t=40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0=12.5\text{ps}$

Distancia: $L=8\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

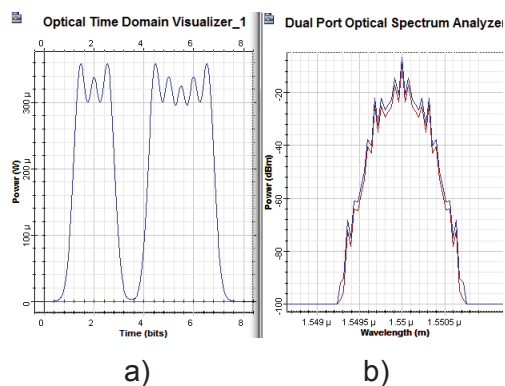


Figura 2. 81 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.81 se puede observar cómo han evolucionado los pulsos luego de haberse propagado una distancia de 8km, tanto temporalmente como espectralmente. Debido al aumento en la velocidad de transmisión se observa una degradación considerable a esta pequeña distancia.

Caso 1.4

Para este caso se aumenta la potencia para observar cómo cambia la forma de la señal en estas condiciones.

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 12.5\text{ps}$

Distancia: $L=8\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

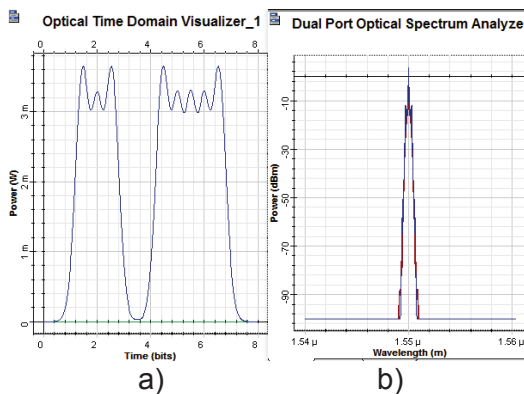


Figura 2. 82 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.82 se puede observar que al aumentar la potencia ha mejorado levemente la forma del pulso.

Caso 1.5

Potencia de transmisión: $P_0=1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t = 60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0 = 8.33\text{ps}$

Distancia: $L = 3\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

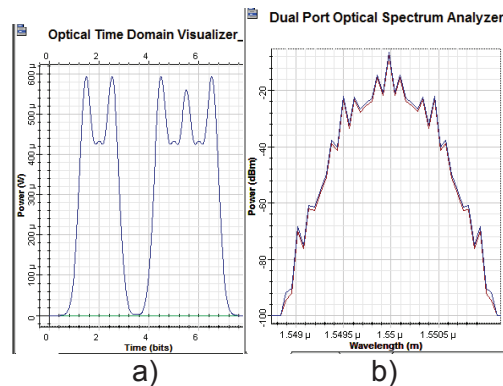


Figura 2. 83 Resultado de la simulación para $L=3\text{km}$, $V_t = 60\text{Gbps}$, $P_0 = 1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.83 se puede observar que a esta velocidad de transmisión los efectos no lineales empiezan a manifestarse a distancias pequeñas.

Sección 2

En este caso se analizará el régimen de dispersión positivo. Los parámetros generales para esta sección son los siguientes:

$$\beta_2 = +6.38 \text{ ps}^2/\text{Km}$$

Longitud de onda: $\lambda = 1550\text{nm}$

Caso 2.1

Potencia de transmisión: $P_0 = 1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t = 20\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0 = 25\text{ps}$

Distancia: $L=32\text{km}$:

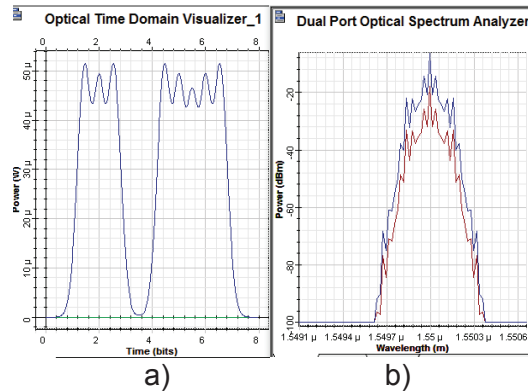


Figura 2. 84 Resultado de la simulación para $L=32\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.84 se puede observar que conforme se aumenta la distancia de transmisión el ensanchamiento de los pulsos es mayor.

Caso 2.2

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 20\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 25\text{ps}$

Distancia: $L=28\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

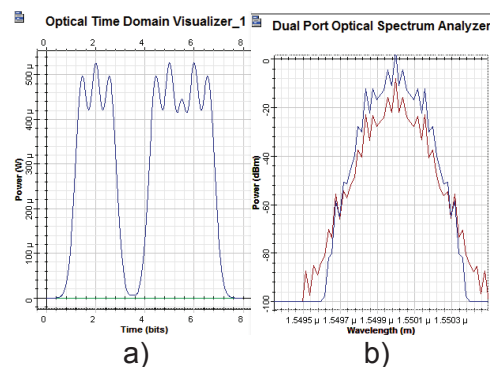


Figura 2. 85 Resultado de la simulación para $L=28\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.85 se puede observar que al trabajar en el régimen de dispersión normal el aumento de potencia solo agrava el impacto de las no linealidades.

Caso 2.3

Potencia de transmisión: $P_0=1\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 12.5\text{ps}$

Distancia: $L=8\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

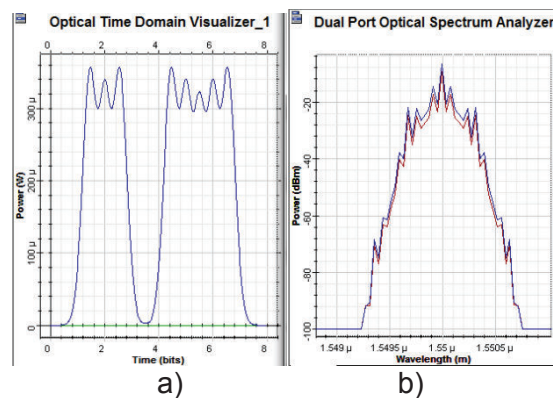


Figura 2. 86 Resultado de la simulación para $L=8\text{km}$, $V_t= 40\text{Gbps}$, $P_0=1\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.86 se puede observar que conforme se aumenta la distancia de transmisión el ensanchamiento de los pulsos es mayor.

Caso 2.4

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 12.5\text{ps}$

Distancia: $L=7\text{km}$

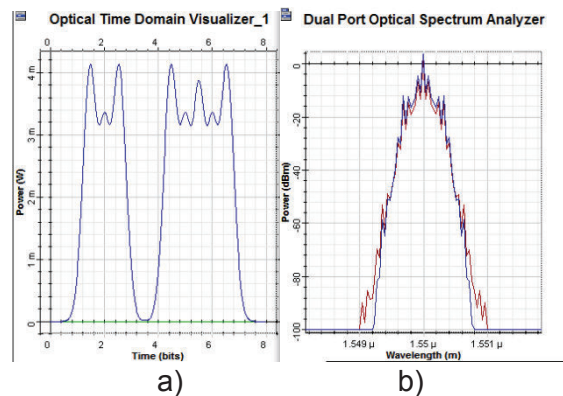


Figura 2. 87 Resultado de la simulación para $L=7\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.87 se puede observar que al trabajar en este régimen de dispersión, al aumentar la potencia de transmisión se acorta la distancia a la que se puede transmitir sin mayor impacto de los efectos no lineales.

Caso 2.5

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t=60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0=8.33\text{ps}$

Distancia: $L=3\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

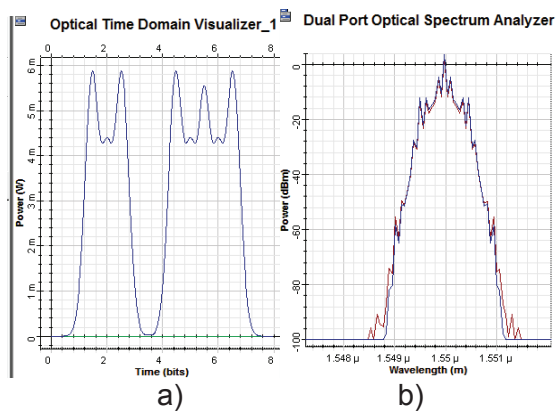


Figura 2. 88 Resultado de la simulación para $L=3\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativa. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.88 se puede que a esta velocidad de transmisión los efectos no lineales empiezan a manifestarse a distancias pequeñas.

2.3.2.3 Simulaciones para la longitud de onda 1565nm

Para este tipo de fibra en esta longitud de onda el parámetro de dispersión cromática aumenta en su valor, se realizan simulaciones en esta longitud de onda debido a que el valor de dispersión cromática es el mayor.

Sección 1

En esta sección se analizará el régimen de dispersión negativo, los parámetros generales para esta sección son los siguientes.

$$\beta_2 = -13 \text{ ps}^2/\text{Km}$$

Longitud de onda: $\lambda=1550\text{nm}$

Caso 1.1

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 50\text{ps}$

Distancia: $L=69\text{km}$

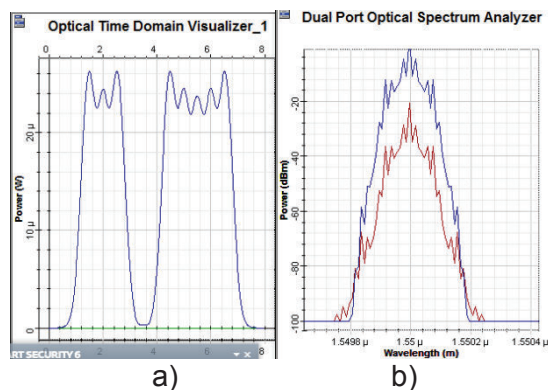


Figura 2. 89 Resultado de la simulación para $L=69\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.89 se puede que a medida que el valor del coeficiente de dispersión cromática aumenta, el impacto de los fenómenos no lineales también aumenta.

Caso 1.2

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 20\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 25\text{ps}$

Distancia: $L=16\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

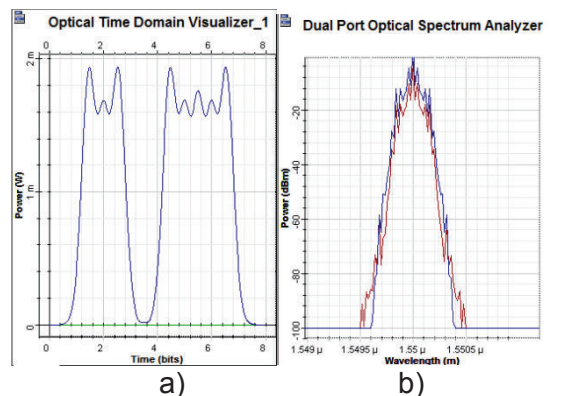


Figura 2. 90 Resultado de la simulación para $L=16\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.90 se puede observar que al duplicar la velocidad de transmisión, los efectos no lineales empiezan a manifestarse a una distancia menor.

Caso 1.3

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 12.5\text{ps}$

Distancia: $L=3\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

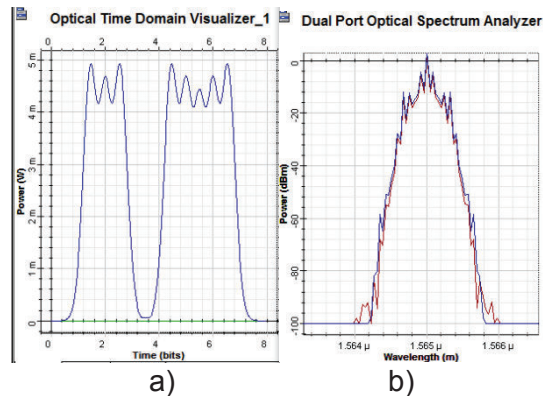


Figura 2. 91 Resultado de la simulación para $L=4\text{km}$, $V_t=40\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.91 se puede observar que conforme se aumenta velocidad de transmisión ya existen problemas de no linealidades en distancias cortas.

Caso 1.4

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t=60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0=8.33\text{ps}$

Distancia: $L=1\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación:

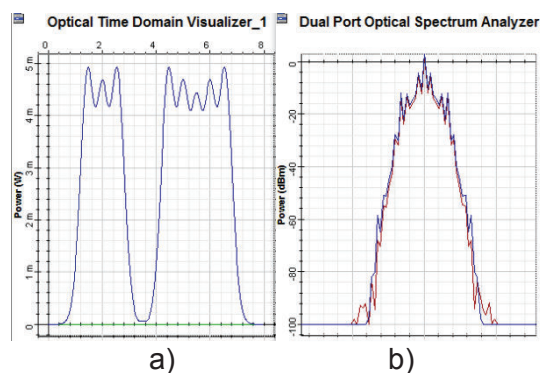


Figura 2. 92 Resultado de la simulación para $L=1\text{km}$, $V_t=60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión negativo. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.92 se puede observar que conforme se aumenta velocidad de trasmisión ya existen problemas de no linealidades en distancias cortas, en este caso ya se observa su aparición en la distancia de 1km.

Sección 2

En esta sección se analizará el régimen de dispersión positivo, los parámetros generales para esta sección son los siguientes.

$$\beta_2 = +13 \text{ ps}^2/\text{Km}$$

Longitud de onda: $\lambda=1550\text{nm}$

Caso 2.1

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 50\text{ps}$

Distancia: $L=60\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

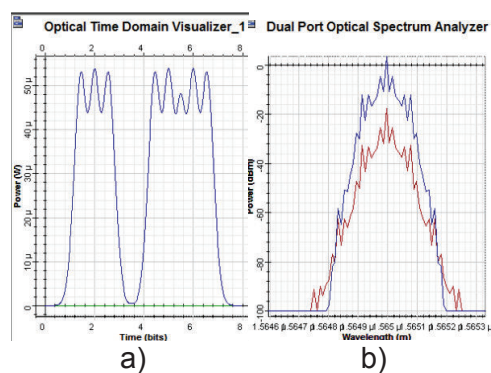


Figura 2. 93 Resultado de la simulación para $L=60\text{km}$, $V_t= 10\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.93 se puede observar la evolución del pulso al trabajar en el régimen normal de dispersión, se observar una mayor degradación de la señal.

Caso 2.2

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 20\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 25\text{ps}$

Distancia: $L=14\text{km}$

En la siguiente figura se muestra el resultado de la simulación en estas condiciones:

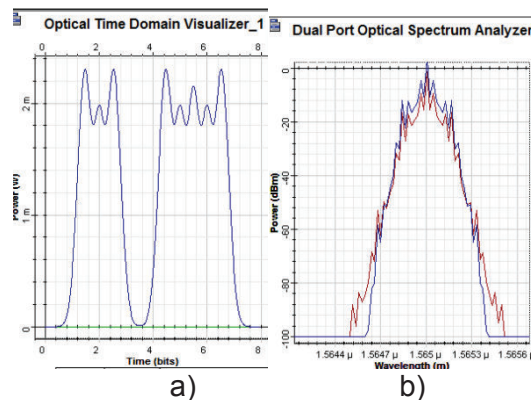


Figura 2. 94 Resultado de la simulación para $L=14\text{km}$, $V_t= 20\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.94 se puede observar la evolución del pulso al trabajar en el régimen normal de dispersión con una velocidad de transmisión mayor, se puede apreciar una degradación similar al caso anterior en una distancia de transmisión menor.

Caso 2.3

Potencia de transmisión: $P_0=10\text{mW}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 60\text{Gbps}$

Ancho del pulso: $T_0= 8.33\text{ps}$

Distancia: $L=2\text{km}$

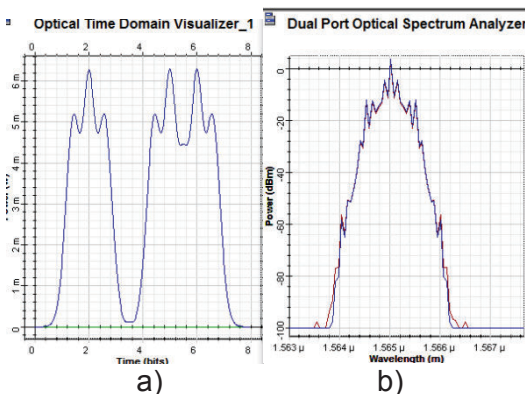


Figura 2. 95 Resultado de la simulación para $L=2\text{km}$, $V_t= 60\text{Gbps}$, $P_0=10\text{mW}$ en la fibra G655.C con dispersión positiva. (a) Forma temporal, (b) forma espectral.

En la figura 2.95 se puede observar la evolución del pulso al trabajar en el régimen normal de dispersión con una velocidad de transmisión mayor.

Nota: en estos casos la transmisión a mayores velocidades no es posible debido a que la señal se degrada incluso para distancias tan pequeñas como 1km.

Nota Fibra G.655.D y G655.E

Los resultados gráficos obtenidos para estas categorías de fibra son muy similares a los obtenidos hasta el momento para las mismas condiciones, la única diferencia radica en la longitud de la fibra a la cual los efectos no lineales se manifiestan, estas longitudes se encuentran en el anexo A para cada caso.

2.4 SIMULACIONES PARA XPM CON DIFERENTES TIPOS DE FIBRA

En esta sección se analizarán los casos más relevantes, en los cuales el fenómeno no lineal XPM se manifiesta. Las tablas del Anexo A muestran las situaciones en las que XPM y SPM se manifiestan, y es en estas condiciones en las que se analizarán los siguientes casos.

Para realizar estas simulaciones se han hecho las siguientes consideraciones:

- a) El diagrama a simular es el siguiente:

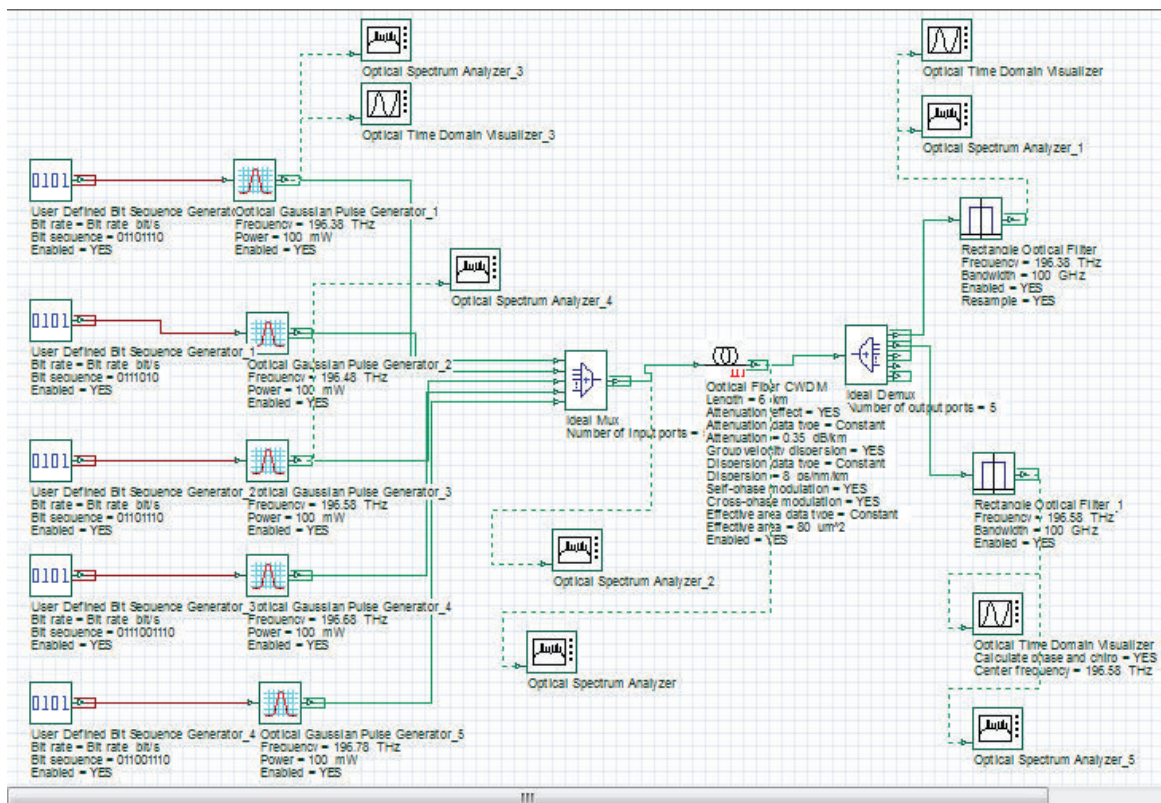


Figura 2. 96 Diagrama de simulación para XPM

Este diagrama consta de los siguientes elementos:

- 5 generadores de secuencias de bits.- cada uno de los generadores tiene su propia secuencia de 8 bits y todos a una velocidad de transmisión definida posteriormente en cada caso.
- 5 generadores de pulsos gaussianos.- estos bloques permiten convertir la señal binaria proveniente de los generadores de secuencias de bit en pulsos gaussianos, el ancho de estos pulsos corresponde a la mitad de tiempo de bit, la potencia de transmisión es configurada de acuerdo a cada caso de estudio y la longitud de onda que entrega cada generador considera y está en correspondencia con la separación que van a tener los canales entre si dependiendo del caso de estudio.
- 1 multiplexor ideal 5 a 1.- este bloque permite intercalar las 5 señales en un solo canal de fibra.

- 1 fibra óptica.- este bloque ayuda a simular la fibra en estudio, las características son propias de cada caso de estudio.
- 1 demultiplexor 1 a 5.- este bloque permite separar la señal proveniente de la fibra en 5.
- 2 filtros rectangulares.- se ha optado por este filtro para discriminar de la mejor manera las señales deseadas, se utilizan dos filtros para determinar la señal más afectada por XPM y se los colocan a la salida del demultiplexor.
- Analizadores ópticos y de espectro.- Estos bloques permiten visualizar las señales tanto en tiempo como en frecuencia y se los ha ubicado a la salida de cada bloque.

b) Velocidades de transmisión límites.- Como es sabido al aumentar la velocidad de transmisión aumenta el ancho de banda de la señal por lo que, si la separación entre canales es reducida, los pulsos aledaños se sobrelaparán. Por este motivo en los casos de separación entre canales inferiores a 50GHz la velocidad máxima de transmisión que se utiliza es de 10Gbps. Esto debido a que el presente trabajo se encuentra orientado a analizar los efectos no lineales de SPM y XPM en pulsos gaussianos.

A continuación se presentan los casos de simulaciones más relevantes y donde es claramente apreciable el impacto de los fenómenos no lineales, los valores de longitudes de onda han sido calculados por el software utilizado puesto que al ingresar los valores de frecuencia de THz este posee la opción de visualizar su correspondiente longitud de onda. No se presentan los valores de ancho de pulso puesto que ya se vio en la sección los valores correspondientes a cada velocidad de transmisión.

2.4.1 SIMULACIONES DE XPM PARA LA FIBRA G.655.E

Se utiliza esta categoría principalmente por su coeficiente de dispersión, el cual es elevado.

Sección 1

Para esta sección de simulaciones se consideran los siguientes parámetros:

Distancia: $L=80\text{km}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

Separación entre canales: $\Delta f=100\text{GHz}$.

Longitud de onda para cada canal: 1526.6nm, 1525.81nm, 1525nm, 1524,26nm, 1523,49nm.

Longitud de onda central: 1525nm.

Coefficiente de dispersión cromática: $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$.

Caso 1.1

Para la señal central (1525nm) con una potencia inicial de 200mW tenemos:

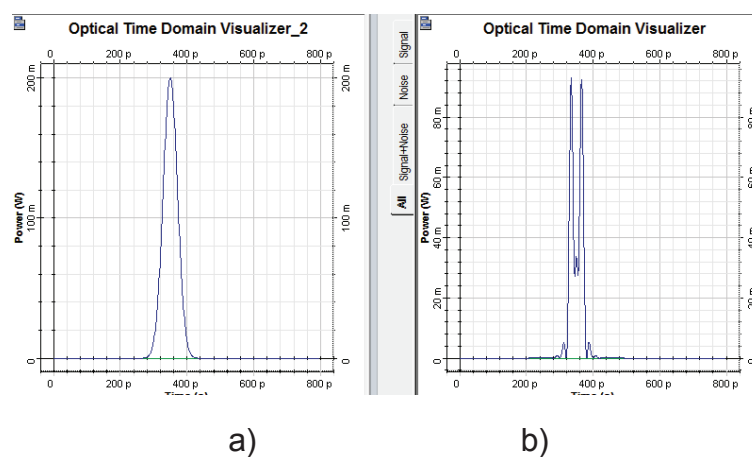


Figura 2. 97 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f = 100\text{GHz}$, longitud de onda central 1525nm, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=200\text{mW}$

Caso 1.2

Para un pulso lateral (1523.49nm) tenemos:

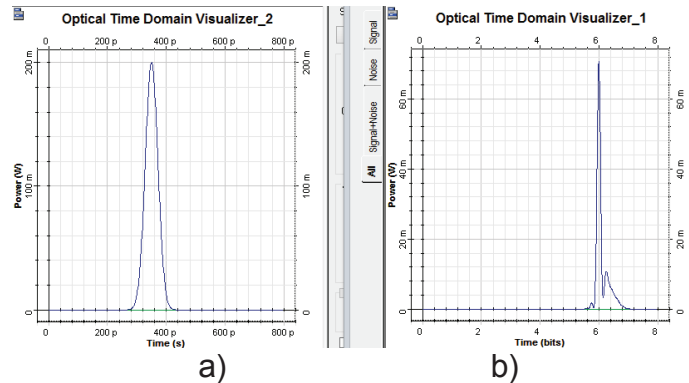


Figura 2. 98 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f = 100\text{GHz}$, longitud de onda lateral 1523.49nm, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=200\text{mW}$

Se puede observar en las figuras 2.97 y 2.98 que la señal más afectada es la que se encuentra en la longitud de onda central para estos ejemplos, por lo que se considerará únicamente las señales en esta longitud de onda para los siguientes casos. La figuras 2.97 (a) y 2.98 (a) corresponden a las señales iniciales antes de propagarse por la fibra óptica.

El espectro de la señal WDM que incluye las cinco lambdas multiplexadas es el siguiente:

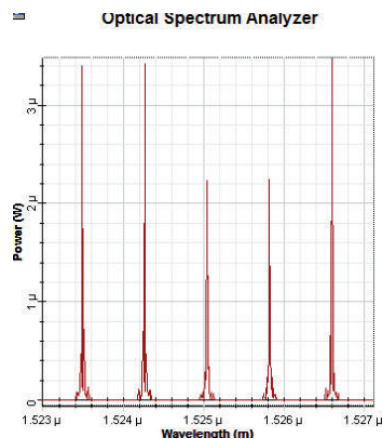


Figura 2. 99 Resultado de espectro de la simulación para XPM, $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f = 100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión

Se puede observar que el impacto de XPM, debido a la baja potencia utilizada, es muy pequeño. El efecto predominante a estos niveles de potencia es GVD conjuntamente con SPM.

Caso 1.3

Para el siguiente caso de análisis aumentamos la potencia a 60mW, para realizar una comparación sobre el impacto de SPM y XPM se ha considerado el caso ideal en el que estos dos efectos son despreciados figura 2.100(a), el caso en el que solo actúa SPM figura 2.100(b) y el caso en el que actúan SPM y XPM figura 2.100(c), para este último caso se configura el programa de OptiSystem para simular ambos fenómenos al mismo tiempo:

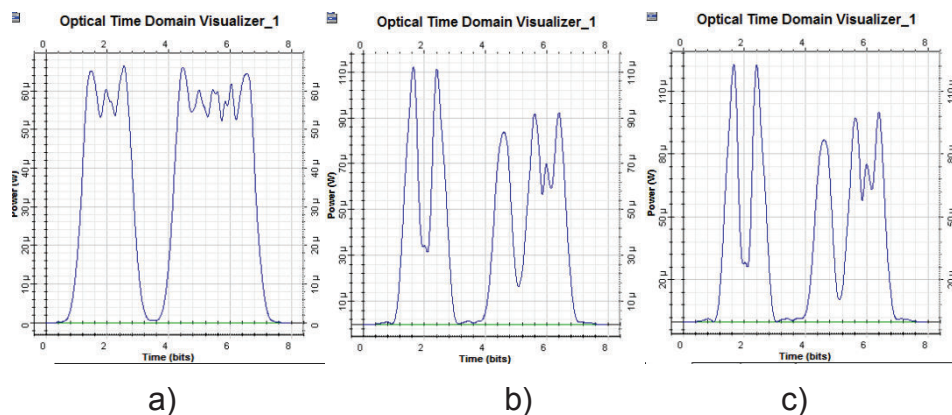


Figura 2. 100 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f = 100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=60\text{mW}$

Se puede observar en el dominio temporal que, como se predijo con las simulaciones de SPM, cuando trabajamos en la región normal de dispersión, SPM ayuda a mitigar la degradación de la transmisión, en este caso XPM no tiene un mayor impacto en la señal.

Caso 1.4

Para el siguiente caso aumentamos la potencia, en esta ocasión a 100mW, y tomando las mismas consideraciones que para el caso anterior obtenemos los siguientes resultados se consideran 3 situaciones: la primera sin efectos de SPM y

XPM figura 2.101(a), la segunda únicamente presenta efectos de SPM figura 2.101(b) y la tercera SPM y XPM combinados figura 2.101(c):

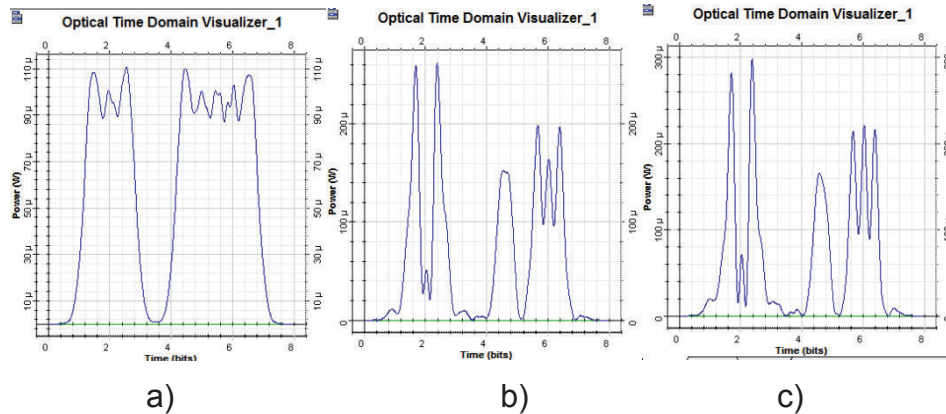


Figura 2. 101 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f = 100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$

Se puede notar que para estas condiciones XPM empieza a ser significativo, sin embargo debido a la compresión inicial del pulso aún no se presentan problemas en estas condiciones.

Es importante tomar en cuenta que para estas condiciones el valor de $\phi_{\text{máx}}$ es superior a la unidad, en este caso es 1.05 (anexo A), por lo que la forma del espectro del pulso, como se observó en las simulaciones de SPM, se ve comprometida de la siguiente manera.

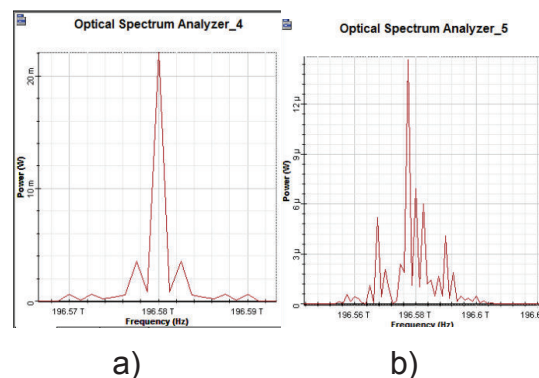


Figura 2. 102 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t= 10\text{Gbps}$, $\Delta f = 100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. a) Espectro inicial, b) espectro resultante

En la figura 2.102 se puede observar un ensanchamiento en el espectro de la señal y un cambio de forma significativo, esto se debe a la alta potencia utilizada.

Sección 2

En esta sección se considera el régimen de dispersión negativo, los datos generales son los siguientes:

Distancia: $L=80\text{km}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

Separación entre canales: $\Delta f=100\text{GHz}$.

Longitudes de onda: 1526.6nm , 1525.81nm , 1525nm , $1524,26\text{nm}$, $1523,49\text{nm}$.

Dispersión cromática: $D(\lambda)= -8\text{ps/nm.km}$.

Caso 2.1

Para la señal central (1525nm) con una potencia inicial de $P_0=10\text{mW}$ luego de haber recorrido la fibra se tiene el siguiente resultado:

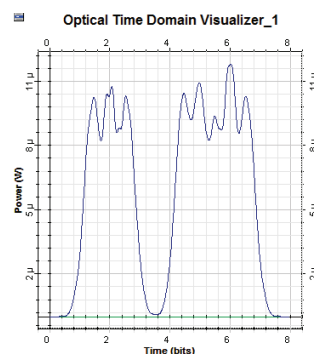


Figura 2. 103 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f = 10\text{GHz}$, -8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$

Relacionando con el caso de dispersión anormal se puede observar en la figura 2.103 una mayor degradación del pulso, no obstante a este nivel de potencia todavía no son de consideración los efectos no lineales.

Caso 2.2

En el siguiente caso se aumentará la potencia a 60mW, se consideran 3 escenarios, el primero sin efectos de SPM y XPM (a), el segundo únicamente efectos de SPM (b) y el tercero SPM y XPM combinados (c):

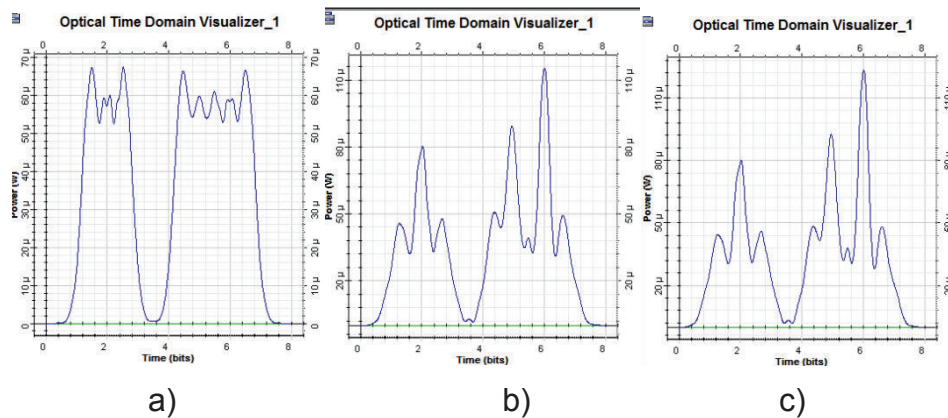


Figura 2.104 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f = 100\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=60\text{mW}$

Se puede observar que la señal ha sufrido una degradación considerable, sin embargo XPM todavía no es significativo, esto se debe principalmente a la separación entre canales es grande, para los siguientes casos de estudio se considera una separación menor.

Sección 3

En este caso se realiza el análisis para una separación entre canales menor.

Distancia: $L=80\text{km}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

Separación entre canales: $\Delta f=50\text{GHz}$

Dispersión cromática: $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$.

Longitudes de onda: 1525.81nm , 1525.42nm , 1525nm , $1524,65\text{nm}$, 1524.26nm .

Caso 3.1

Potencia: $P_0 = 10\text{mW}$.

El gráfico resultante de la señal presentada en la figura 2.105 luego de haberse propagado por la fibra para la frecuencia central.

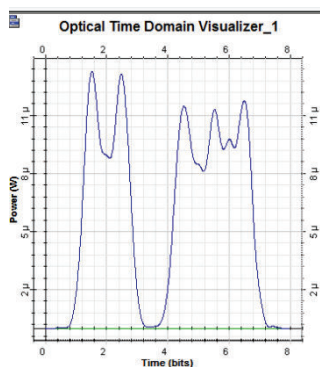


Figura 2. 105 Resultado temporal de simulación para XPM con $V_t = 10\text{Gbps}$, $\Delta f = 50\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0 = 10\text{mW}$. Se puede observar que no existe un impacto de XPM significativo con este nivel de potencia, puesto que la señal aún mantiene su forma.

Caso 3.1

El siguiente caso se analizará con una potencia de 60mW . Para poder realizar el análisis adecuadamente volvemos a considerar los tres casos previamente vistos, esto es el primero sin presencia de SPM ni XPM (a), el segundo solo con presencia de SPM (b) y el tercero solo con presencia de XPM (c).

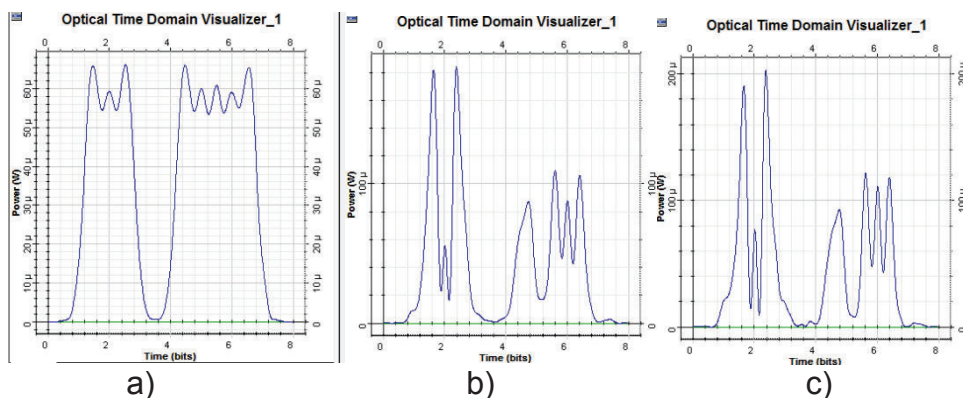


Figura 2. 106 Resultado de simulación para XPM con $V_t = 10\text{Gbps}$, $\Delta f = 50\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0 = 60\text{mW}$

Como se ha visto previamente SPM ocasiona una compresión del pulso en ciertas circunstancias. El impacto de XPM no es significativo, en estas condiciones todavía se puede recuperar la señal.

Caso 3.2

En este caso se realiza el análisis para 100mW, con las mismas consideraciones anteriores:

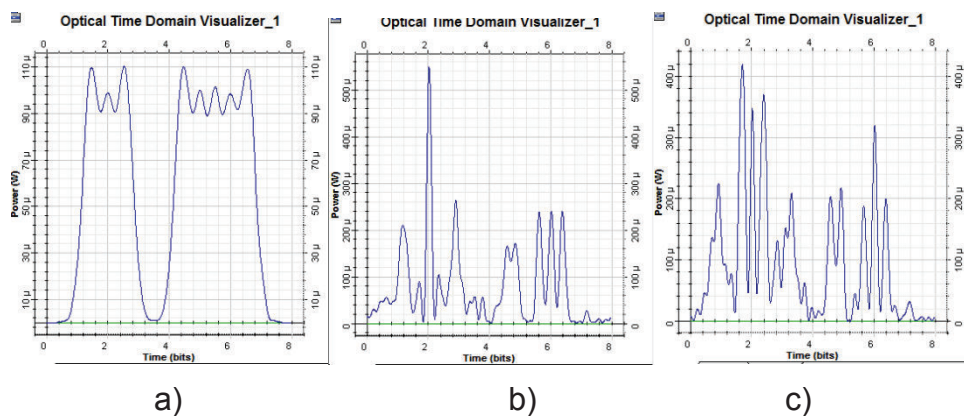


Figura 2. 107 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=50\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$

Se puede observar en la figura 2.107(c) que con esta separación de canales y a esta potencia XPM ya es relevante (en comparación con la figura 2.107(b)) y como se vio en la teoría, XPM agrava el efecto de SPM, la señal en estas condiciones ha sido degradada totalmente y su recuperación tendrá errores.

Sección 4

En esta sección se analiza una separación entre canales menores.

Distancia: $L=80\text{km}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

Separación entre canales: $\Delta f=25\text{GHz}$.

Dispersión cromática: $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$.

Caso 4.1

Potencia: $P_0 = 10\text{mW}$.

Longitudes de onda: 1525.81nm, 1525.42nm, 1525nm, 1524,65nm, 1524.26nm.

El gráfico resultante de la señal presentada en la figura 2.108 luego de haberse propagado por la fibra para la frecuencia central.

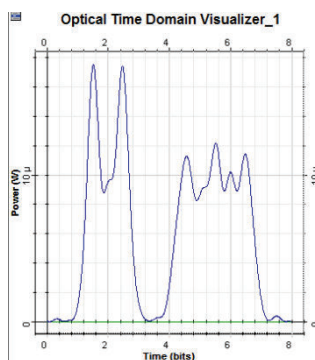


Figura 2. 108 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$

En la figura 2.108 se puede observar que el pulso central ha sufrido un mayor cambio su forma, el espectro de la señal entrante y resultante es el siguiente:

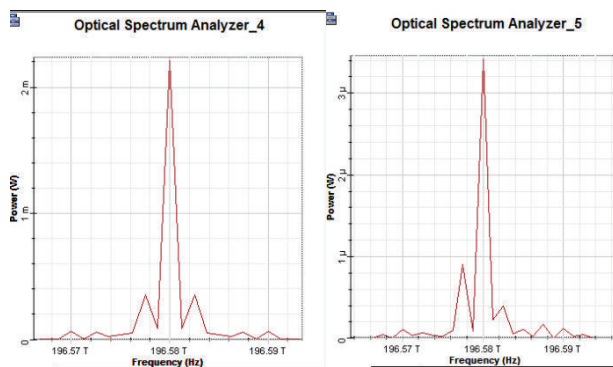


Figura 2. 109 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$

Existe una degradación en la forma del espectro no son muy significativas debido al nivel de potencia utilizado.

Caso 4.2

En este caso se aumenta la potencia a 40mW, en la siguiente figura se puede observar la degradación de la señal en la que se han considerado tres casos, el primero en ausencia de SPM y XPM (a), el segundo únicamente la presencia de SPM (b), y el tercero la presencia de ambos efectos (c) cuyos resultados se presentan en la figura 2.110 respectivamente:

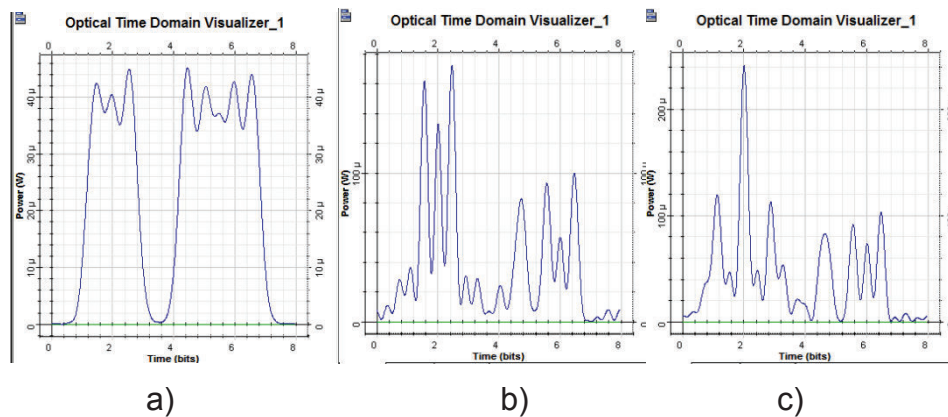


Figura 2. 110 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$

En estos resultados se puede observar claramente que el impacto de XPM es mayor conforme la potencia aumenta y la separación entre canales disminuye, en estas condiciones la señal todavía es recuperable. En la siguiente figura se analizarán los cambios que sufre el espectro debido a SPM y XPM:

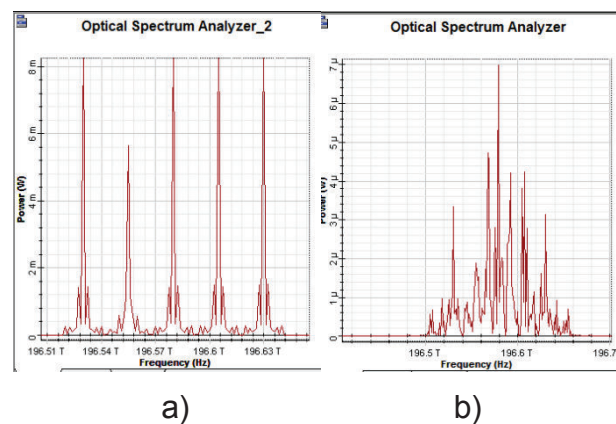


Figura 2. 111 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$

En la figura 2.111 (a) se observa el espectro de la señal WDM con una separación de 25GHz, en la segunda imagen (b) se visualiza cómo los efectos de SPM y XPM han degradado la señal.

Caso 4.3

Se considera un último caso para estas condiciones aumentando la potencia a 100mW:

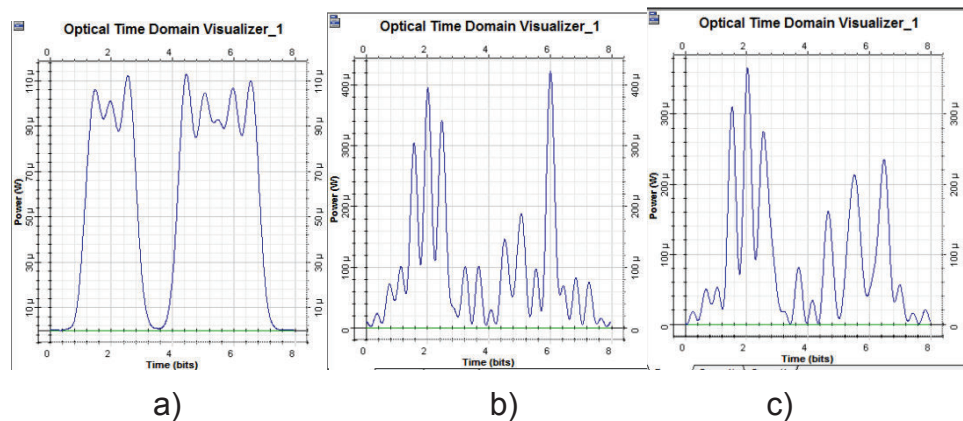


Figura 2. 112 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. (a) en ausencia de SPM y XPM, (b) únicamente la presencia de SPM, (c) presencia de SPM y XPM

En la figura se puede observar una mayor degradación de los pulsos y su recuperación ya puede conllevar a errores, esto se debe a que pequeña separación entre canales, esto ocasiona que el impacto de XPM se vea agravado.

Sección 5

La siguiente sección de casos se los realiza para la región normal de dispersión inicialmente con una potencia pequeña, que luego se irá aumentando para observar paso a paso la evolución de los pulsos, las condiciones para el siguiente caso son:

Distancia: $L=80\text{km}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

Separación entre canales: $\Delta f=25\text{GHz}$.

Dispersión cromática: $D(\lambda) = -8\text{ps/nm.km}$.

Longitudes de onda: 1525.81nm, 1525.42nm, 1525nm, 1524,65nm, 1524.26nm.

Caso 3.1

Potencia: $P_0 = 10\text{mW}$.

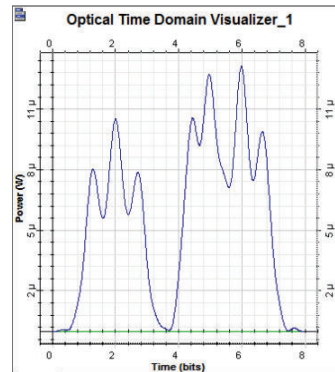


Figura 2. 113 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, -8ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$

Al igual que los casos anteriores, y como es esperado, la señal se degrada más rápidamente en este régimen de dispersión, solo se ha tomado en cuenta el pulso central, el cual es el que sufre la mayor degradación.

Caso 3.2

Con una potencia de 40 mW:

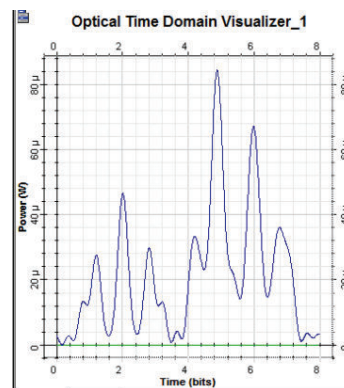


Figura 2. 114 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, -8ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$

En estas condiciones ya se pueden presentar errores en la recuperación de la señal, y se observa la aparición de nuevas componentes en la forma de la señal.

Caso 3.3

Al aumentar la potencia a 100mW se obtiene el siguiente resultado:

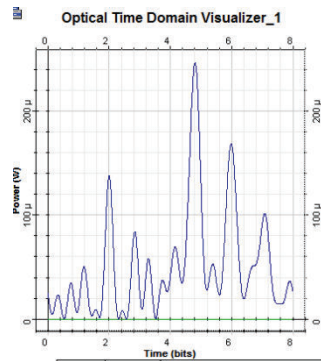


Figura 2. 115 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$

Se puede observar una degradación total de la señal y ya no es posible recuperarla, esto se debe al impacto de XPM como se puede observar en el espectro correspondiente a la señal WDM luego de haber recorrido la fibra:

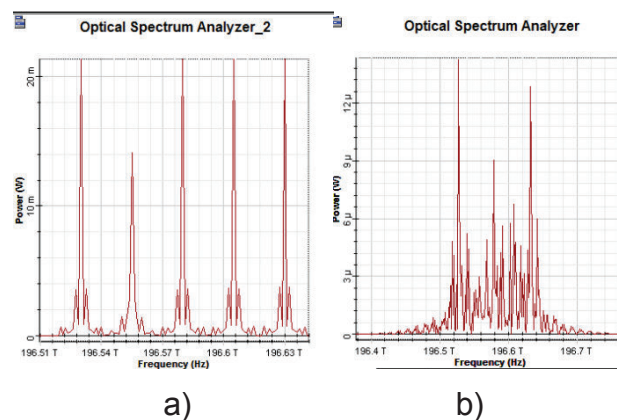


Figura 2. 116 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=25\text{GHz}$, 8ps/nm.km de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. a) Señal WDM inicial, (b) señal WDM final

Claramente es observable que el espectro de la señal ha sufrido una degradación considerable, esto se debe al ensanchamiento del espectro de las señales.

2.4.2 SIMULACIONES DE XPM PARA FIBRA G.655.C

Para los siguientes casos de análisis se aumentará la velocidad de transmisión a 40Gbps, además se utilizará la fibra G.655.C por motivos de estudio debido a que a esta velocidad de transmisión la distancia de transmisión es muy reducida si el coeficiente de dispersión es alto, por lo que para motivo de análisis es conveniente utilizar la fibra G655C por su bajo coeficiente de dispersión.

La señal inicial a analizar es la siguiente para todos los casos:

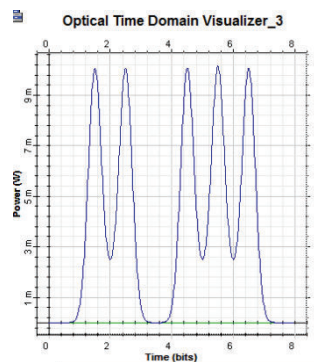


Figura 2. 117 Señal inicial para simulación de XPM con $V_t= 40\text{Gbps}$

Esta señal corresponde a la secuencia de bits 01101110, se ha seleccionado esta secuencia porque permite identificar cuándo empiezan a aparecer problemas de ISI, se ha considerado una secuencia de tres pulsos consecutivos debido a que el pulso más afectado se encuentra en el pulso de la mitad puesto que los que ocasionan ISI son los pulsos aledaños.

Sección 1

Datos:

Distancia: $L=14\text{km}$

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$.

Separación entre canales: $\Delta f=100\text{GHz}$.

Dispersión cromática: $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$.

Frecuencias: 1526.6nm, 1525.81nm, 1525nm, 1524,26nm, 1523,49nm

Caso 1

Potencia: $P_0 = 10\text{mW}$

El resultado de la simulación en estas condiciones es el siguiente:

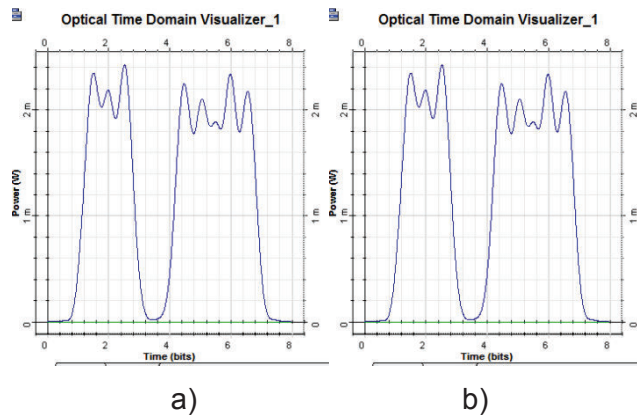


Figura 2. 118 Resultado temporal de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$. a) 1525.6nm, b) 1525nm.

Se puede apreciar que, como se ha visto anteriormente, el impacto de XPM no es significativo para pequeñas potencias de transmisión y para grandes separaciones entre canales, en la figura 2.118 (a) se puede apreciar la señal para la longitud de onda 1525.6nm y en la (b) la señal para la longitud de onda 1525nm.

La siguiente imagen muestra el espectro de la señal WDM correspondiente a los 5 canales:

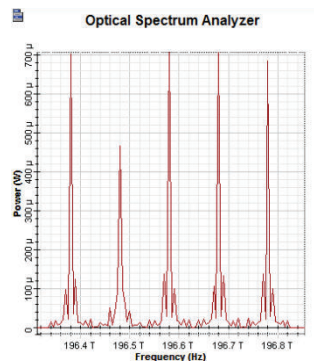


Figura 2. 119 Resultado espectral de la simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$

Se puede observar que los espectros de cada canal están muy cercanos el uno del otro, esto es porque a medida que se aumenta la velocidad de transmisión el ancho de banda que ocupa cada señal aumenta, es por eso que los casos de análisis se verán limitados para ciertas velocidades de transmisión en relación con la separación entre canales. Existen mecanismos para remediar esta situación como modulación OFDM, sin embargo el presente trabajo se limita al estudio del impacto de los fenómenos no lineales en pulsos gaussianos.

Caso 1.2

Para el siguiente caso se aumentará la potencia a 40mW

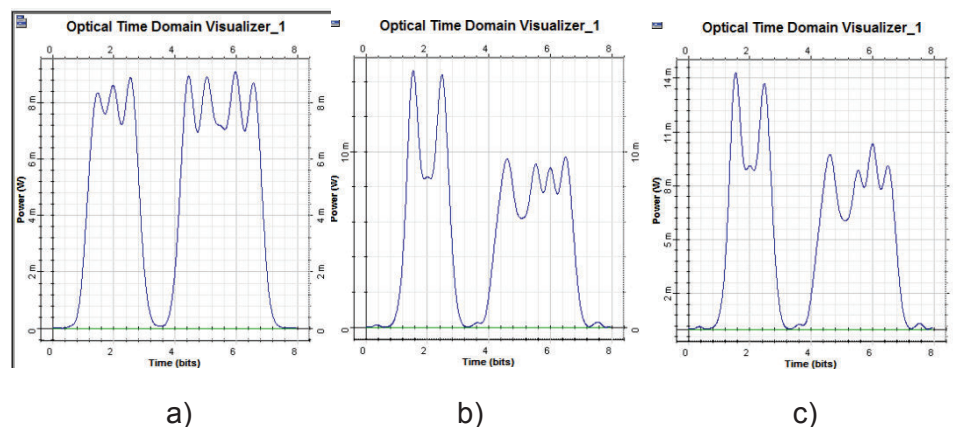


Figura 2. 120 Resultado de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=40\text{mW}$. a) En ausencia de SPM, b) únicamente presencia de SPM, c) Presencia de SPM y XPM.

En esta figura 2.120 se han considerado los tres casos, el primero en ausencia de SPM y XPM (a), el segundo únicamente la presencia de SPM (b), y el tercero la presencia de ambos efectos (c). En estas condiciones se puede observar que XPM empieza a manifestarse por cuanto existe una variación en la forma de la señal 2.120(c) con respecto a 2.120(b).

Caso 1.3

El siguiente caso se realizará con una potencia de 100mW:

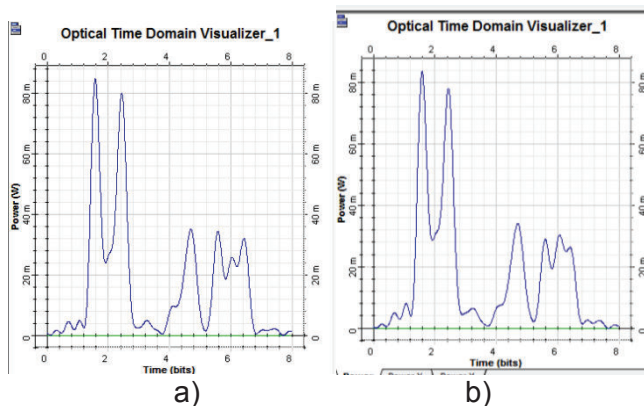


Figura 2. 121 Resultado de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=100\text{mW}$. , a) únicamente presencia de SPM, b) Presencia de SPM y XPM.

Se puede notar que la compresión inicial que ha sufrido el pulso ha ayudado a mitigar el efecto de SPM y GVD, debido a la gran separación entre canales XPM no tiene mayor impacto, en la figura 2.121 (a) se puede observar la forma del pulso en presencia únicamente de SPM y en la figura 2.121(b) la presencia de ambos efectos.

Caso 1.4

El siguiente caso se lo realiza utilizando el coeficiente dispersión negativo (-3ps/nm.km) con una potencia de 100mW para comparar con el caso anterior.

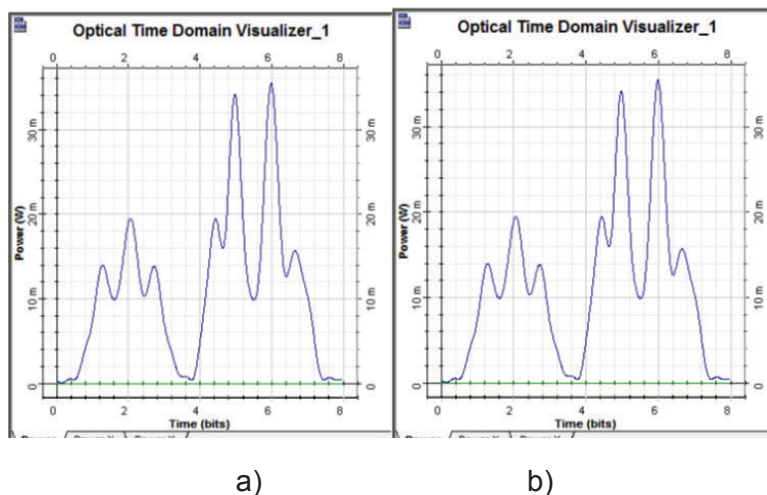


Figura 2. 122 Resultado de simulación para XPM con $V_t=40\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $D(\lambda)= -3\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=100\text{mW}$

En la figura 2.122 (a) se puede observar la forma del pulso en presencia únicamente de SPM y en la figura 2.122(b) la presencia de ambos efectos.

Es apreciable una mayor degradación de la señal debido a la alta potencia utilizada, sin embargo XPM no tiene mayor impacto en estas condiciones.

Como se pudo observar en las simulaciones de SPM, en este caso para XPM, los resultados para las demás fibras serán muy similares a los presentados hasta aquí, la diferencia radicará en la distancia a la que los pulsos se degradan siendo el parámetro de dispersión el de mayor relevancia.

2.4.3 IMPACTO DE XPM EN SISTEMA CON DIFERENTE NÚMERO DE CANALES

En esta sección se utilizarán diferente número de canales para observar la evolución de los pulsos en estas condiciones y el impacto que tiene XPM sobre los mismos. En esta sección se utilizara la siguiente secuencia de bits: 0001000, esto para poder observar de mejor manera como se distorsiona la señal.

Caso 1

Para este primer caso se aumenta el número de canales a 10. Los parámetros para la simulación son los siguientes:

Separación entre canales: $\Delta f=100\text{GHz}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

Distancia: $L=80\text{km}$

Coefficiente de dispersión cromática: $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$.

Frecuencia para cada canal: 192.6THz, 192.7THz, 192.8THz, 192.9THz, 193THz, 193.1THz,193.2THz, 193.3THz, 193.4THz.193.5THz

En la siguiente figura se puede observar la evolución de los pulsos para 5 canales, se ha tomado como referencia la señal de los canales de longitud de onda lateral, y 3 longitudes de onda intermedias.

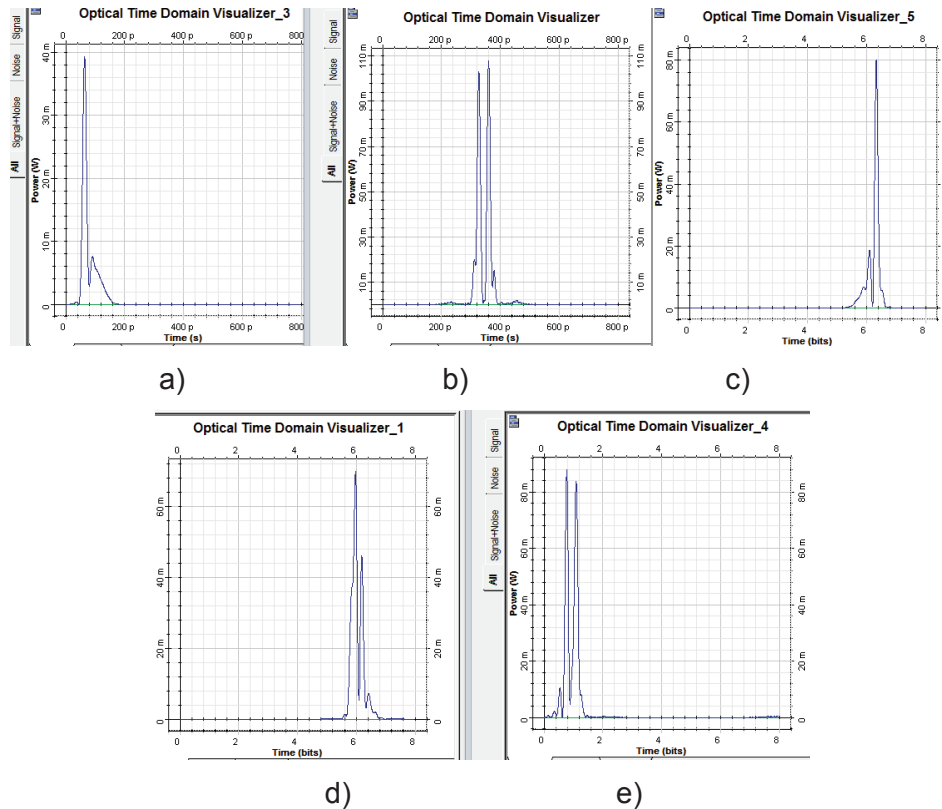


Figura 2. 123 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $L=80\text{km}$ $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=200\text{mW}$, a)192.6THz b)193THz c)192.8THz d)193.2 THz e) 193.4THz

Como se puede observar en la figura, el mayor impacto se lo encuentra en el pulso de longitud de onda central, mientras que la forma de la señal de las longitudes de onda lateral presentan un impacto de efectos no lineales menor, esto se debe a que el impacto de XPM es causado principalmente de las señales adyacentes, también se puede notar que la degradación de las señales intermedias son muy similares entre sí.

Caso 2

Para este caso se aumenta el número de canales a 14, se reduce la separación entre canales a 50GHz y, para poder observar el impacto de XPM y SPM, se ha disminuido

la distancia de la fibra, de esta manera los efectos de ensanchamiento por GVD se reducen y se puede observar de mejor manera el impacto de XPM en esta separación de canales reducida. Los parámetros para la simulación son los siguientes:

Separación entre canales: $\Delta f=50\text{GHz}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

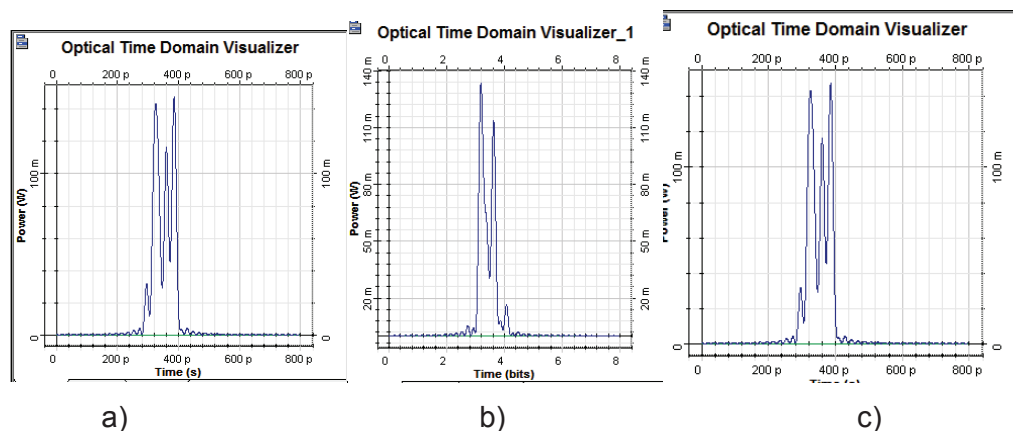
Distancia: $L=1\text{km}$

Coeficiente de dispersión cromática: $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$.

Frecuencia para cada canal: 192.80THz, 192.85THz, 192.9THz, 192.95THz, 193THz, 193.05THz, 193.1THz, 193.15THz, 193.20THz, 193.25THz, 193.30THz, 193.35THz, 193.40THz, 193.45THz

En la siguiente figura 1.124 se observa como ha sido degradada la señal de 6 canales, se han tomado en cuenta los dos canales de longitud de onda lateral y cuatro canales intermedios.

Comparando esta figura 2.124 con la figura 2.123 se puede observar que la degradación de las señales intermedias es similar, es por ello que se puede concluir que para realizar el análisis de XPM independientemente del número de canales las señales más influyentes son aquellas aledañas a la señal estudiada.



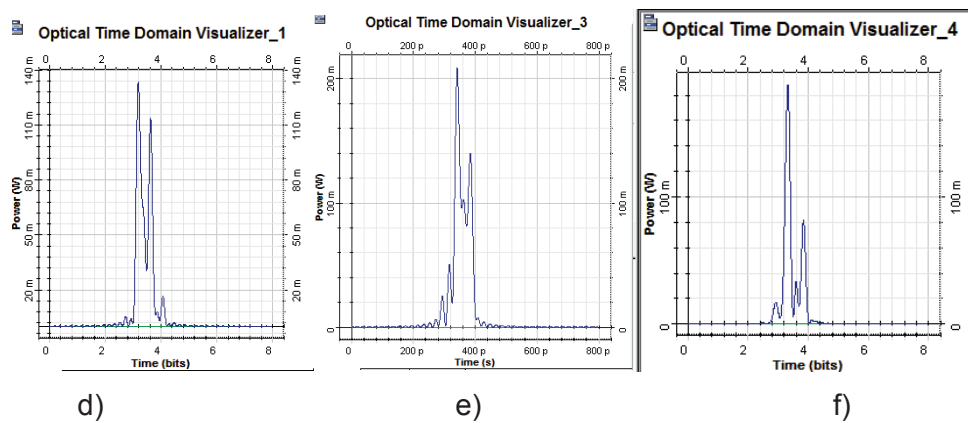


Figura 2. 124 Resultado de simulación para XPM con $V_t=10\text{Gbps}$, $\Delta f=50\text{GHz}$, $L=1\text{km}$ $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$ de dispersión, $P_0=200\text{mW}$, a) 193THz b) 192.8THz c) 193.05THz d) 193.45THz e) 192.9 THz f) 193.3THz

En la siguiente figura se puede observar cómo ha cambiado la forma del espectro en estas coediciones:

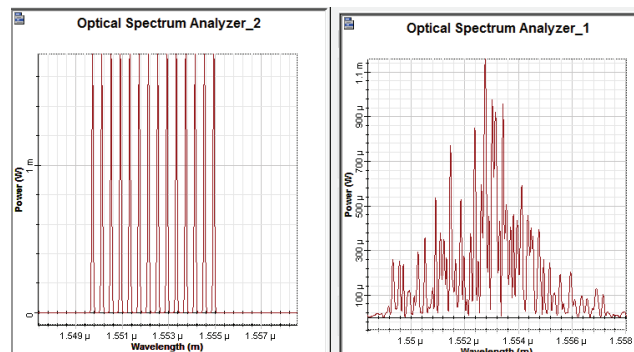


Figura 2. 125 Resultado espectral de la señal WDM con 14 canales

En estas condiciones se puede observar que existe una degradación significativa de la señal, esto se debe a la alta potencia utilizada y a la reducida separación entre canales.

2.5 COMPARACIÓN DEL EFECTO SPM ENTRE FIBRAS

Para realizar esta comparación se someterá una misma señal a diferentes fibras, los parámetros generales serán los mismos y los únicos que cambiarán son los propios de cada tipo de fibra.

Para esta sección se han considerado las fibras: G652, G6553, G6554, G655 y G6556, esto para obtener una perspectiva general de la evolución del pulso en los diferentes tipos de fibra normalizados por la UIT-T.

Los parámetros que se utilizarán son: niveles de potencia de 10mW y 40mW, velocidades de transmisión de 10Gbps y 40Gbps con longitudes de 20km y 60km en la longitud de onda de 1550nm.

Para todos los casos la señal inicial correspondiente a la secuencia de bits 01101110 es:

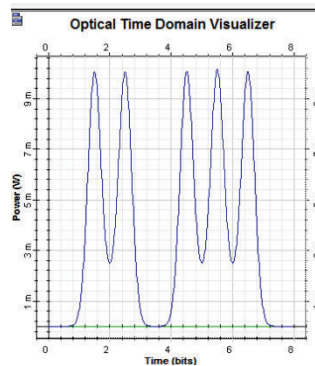


Figura 2. 126 Señal inicial para la comparación entre fibras

- Parámetros de la fibra G.652.D [28]:

Dispersión cromática: $D(\lambda)=17\text{ps/nm.km}$.

Área efectiva $80\mu\text{m}^2$.

Atenuación: 0.27dB/km

- Parámetros de la fibra G.654.D [29] :

Dispersión cromática: $D(\lambda)=20\text{ps/nm.km}$.

Área efectiva $100\mu\text{m}^2$.

Atenuación: 0.22dB/km

- Parámetros la fibra G656 [30]:

Dispersión cromática: $D(\lambda)=7\text{ps/nm.km}$.

Área efectiva $80\mu\text{m}^2$.

Atenuación: 0.35dB/km

- Los parámetros para las fibras G.653.C y G.655.D son los mismos que se vio en el capítulo 1.

Estos parámetros han sido tomados de las normas vigentes de la ITU, como se puede ver en el anexo B, una de las fibras que más comúnmente se está utilizando en el mercado es la fibra G.652.D principalmente por su bajo costo, sin embargo se puede observar en los parámetros de ésta fibra que el coeficiente de dispersión es relativamente alto y esto conlleva a presencia de no linealidades pronunciadas en velocidades de transmisión altas.

Esta comparación se la realiza para una velocidad de 10Gbps por canal, esta velocidad de transmisión es a la que actualmente trabajan las empresas de telecomunicaciones locales, también se realiza una comparación a la velocidad de transmisión a 40Gbps por ser la velocidad que se está empezando a implementar y por ser la fibra G.652 una fibra muy utilizada, se analizará el impacto que van a tener los efectos no lineales en estas condiciones, siendo como mecanismo remedial en última instancia, el reemplazo de la fibra.

En todas las siguientes figuras, la figura (a) corresponde a la fibra G.652.D, la (b) a la fibra G.653.C, la (c) a la fibra G.654.D, la (d) a la fibra G.655.C y la (e) a la fibra G.656.

Caso 1:

Potencia: $P_0= 10\text{mW}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 10\text{Gbps}$.

Longitud de fibra: $L=20\text{km}$.

En la figura 2.127 se puede observar la evolución del pulso en las cinco categorías de fibras para estas condiciones.

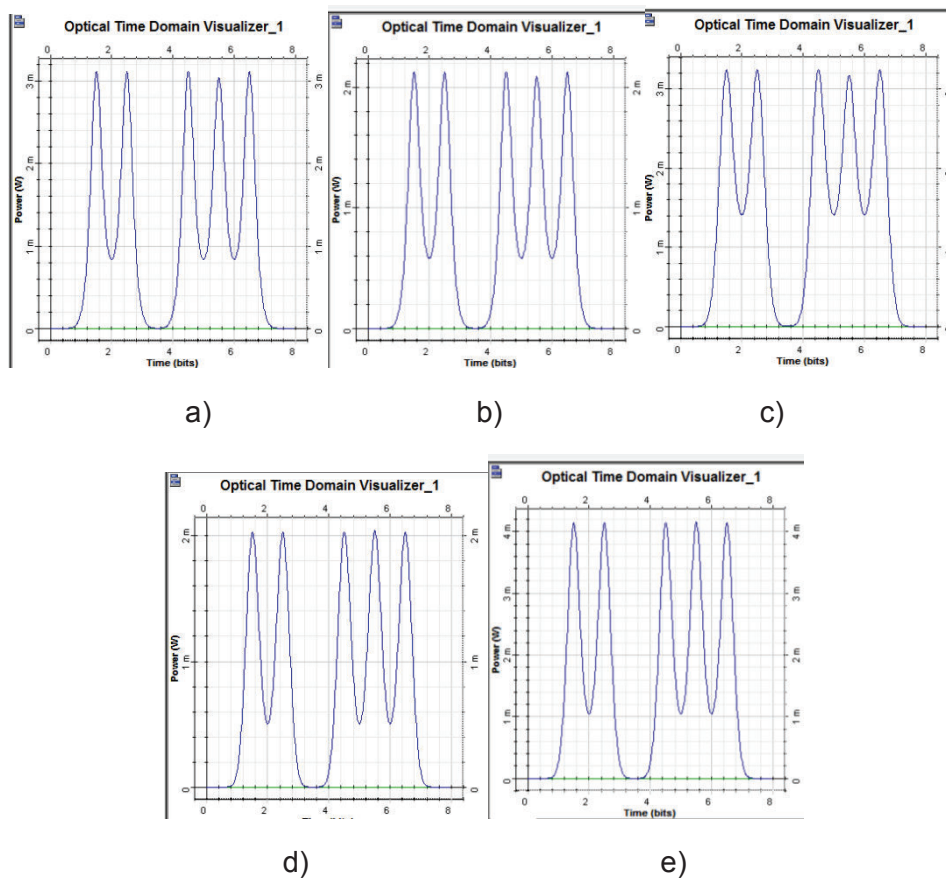


Figura 2. 127 comparativa de SPM para el caso 1, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

Se puede observar que en estas condiciones no existe alteración en la señal en ninguna de las categorías de fibra.

Caso 2:

Potencia: $P_0 = 10\text{mW}$.

Velocidad de transmisión: $V_t = 10\text{Gbps}$.

Longitud de fibra: $L = 60\text{km}$.

En la figura 2.128 se puede observar la evolución del pulso en las cinco categorías de fibras para estas condiciones.

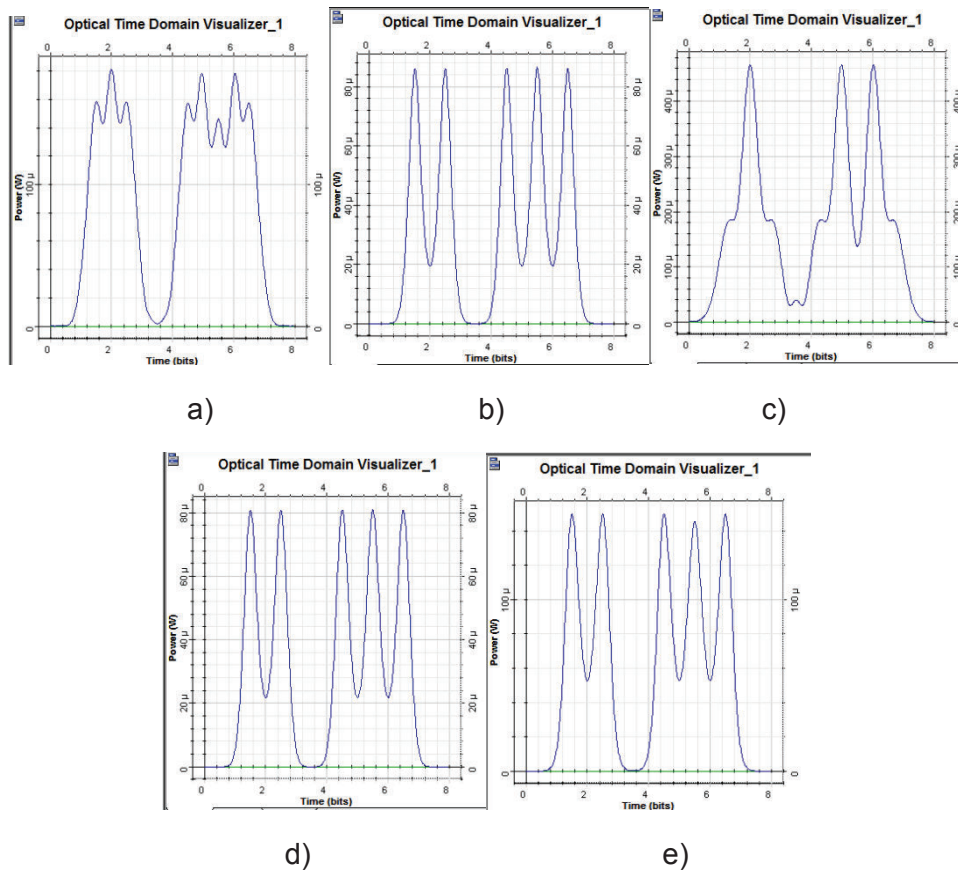


Figura 2. 128 comparativa de SPM para el caso 2, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

En esta figura se puede observar que las señales más afectadas son las correspondientes a las fibras G.652 y G.654, esto por sus coeficientes de dispersión que son elevados, para estas mismas condiciones las otras fibras no presentan problemas.

Caso 3:

Potencia: $P_0 = 40\text{mW}$.

Velocidad de transmisión: $V_t = 10\text{Gbps}$.

Longitud de fibra: $L = 20\text{km}$.

En la figura 2.129 se puede observar la evolución del pulso en las cinco categorías de fibras para estas condiciones.

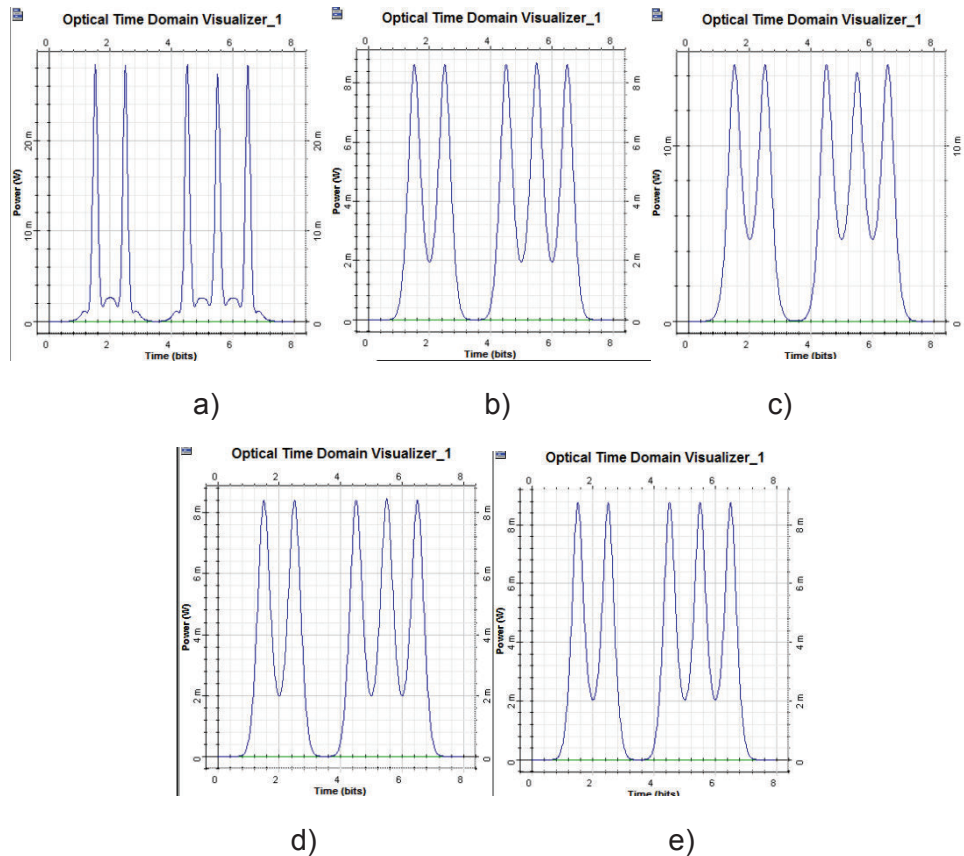


Figura 2. 129 comparativa de SPM para el caso 3, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

En este caso se ha aumentado la potencia considerablemente, debido a que la fibra G.652 presenta un coeficiente de dispersión alto, la compresión del pulso inicial es elevada.

Sin embargo la fibra G.654 a pesar de tener un coeficiente elevado no presenta una compresión visible, esto se debe a su gran área efectiva, al aumentar el área efectiva los efectos no lineales son mitigados, es por eso que el efecto de compresión por parte de SPM es disminuido considerablemente.

Caso 4:

Potencia: $P_0 = 40\text{mW}$.

Velocidad de transmisión: $V_t = 10\text{Gbps}$.

Longitud de fibra: $L = 60\text{km}$.

En la figura 2.130 se puede observar la evolución del pulso en las cinco categorías de fibras para estas condiciones.

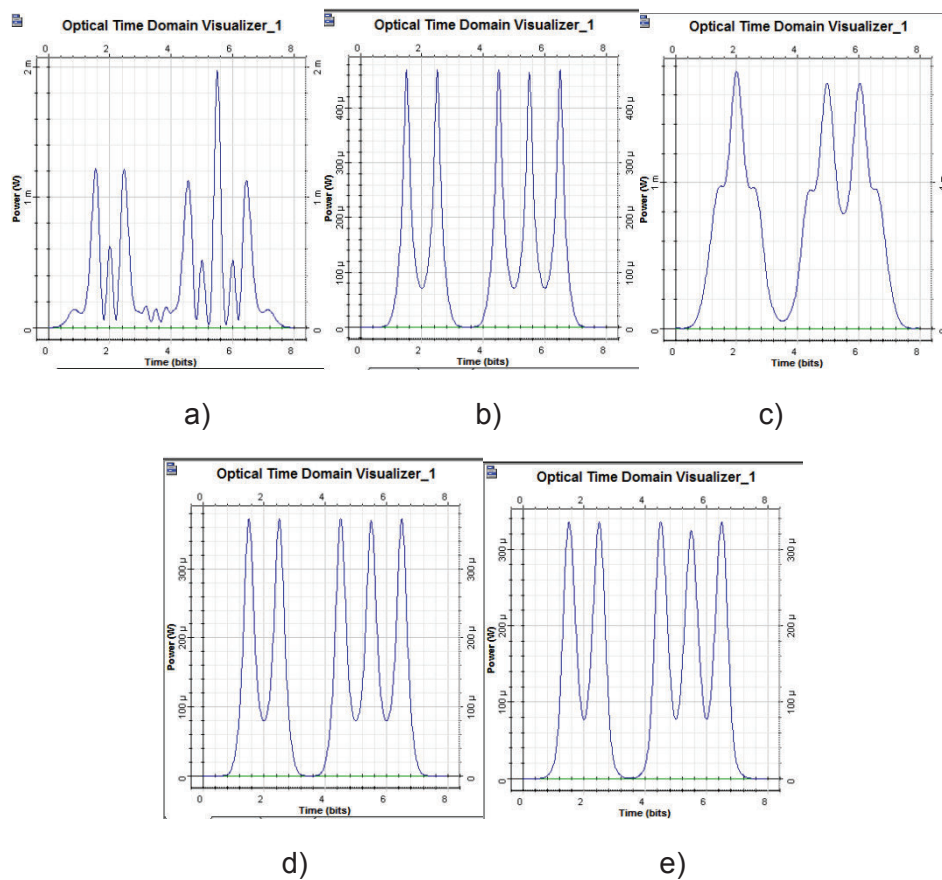


Figura 2. 130 comparativa de SPM para el caso 4, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

En este caso se puede observar que la señal de la fibra G.652 ha sufrido cambios drásticos en su forma, es por este motivo que las empresas de telecomunicaciones han limitado la potencia de las señales en esta fibra a 10mW .

Caso 5:

Potencia: $P_0=10\text{mW}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$.

Longitud de fibra: $L=20\text{km}$.

En la figura 2.131 se puede observar la evolución del pulso en las cinco categorías de fibras para estas condiciones.

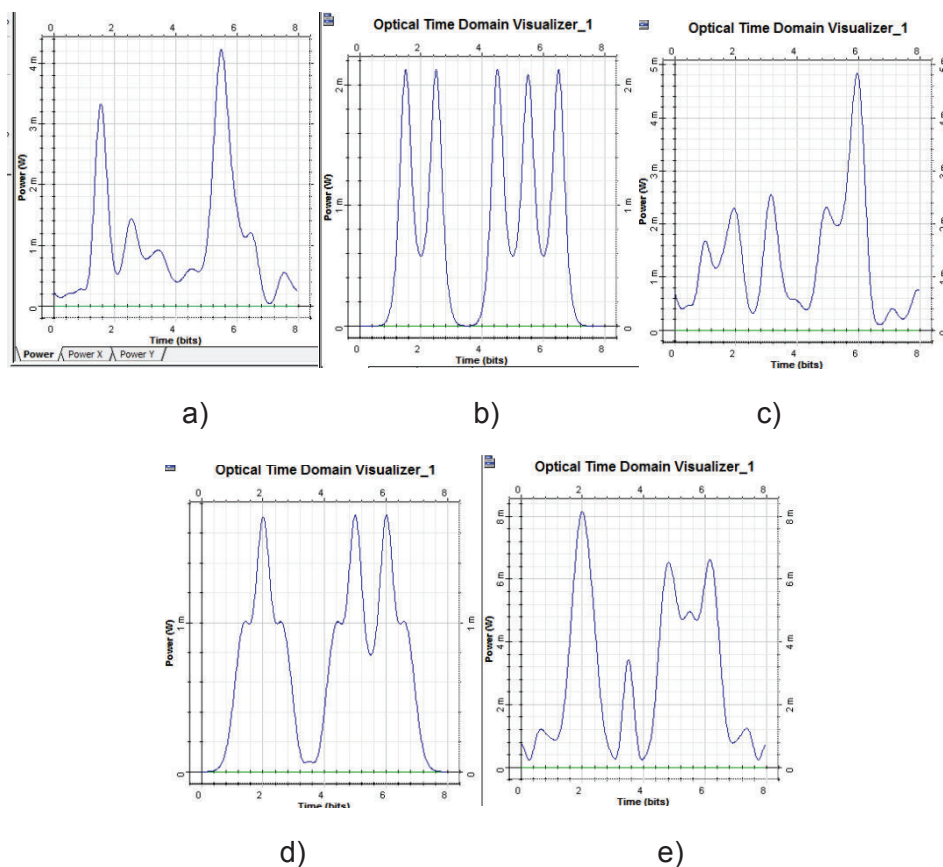


Figura 2. 131 comparativa de SPM para el caso 5, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

Se puede observar que a esta velocidad de transmisión los efectos de SPM y GVD son acentuados y las señales se han degradado considerablemente, excepto en la fibra G.653 debido a su relativamente bajo coeficiente de dispersión. Sin embargo en la fibra G.655 que también es muy utilizada en especial para los sistemas WDM el

impacto no es muy significativo y como veremos más adelante, recuperar la forma de la señal es muy sencillo.

Caso 6:

Potencia: P_0 10mW.

Velocidad de transmisión: V_t = 40Gbps.

Longitud de fibra: L =60km.

En la figura 2.132 se puede observar la evolución de las señales:

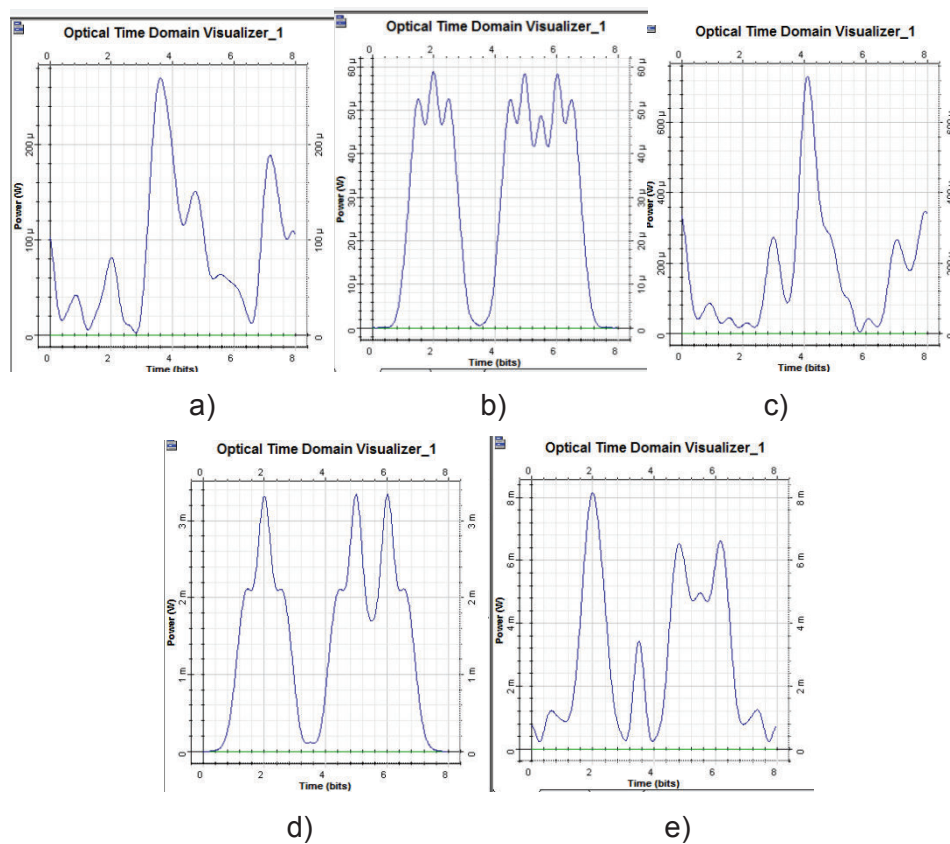


Figura 2. 132 comparativa de SPM para el caso 6, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

Para estas condiciones como se puede observar las mejores fibras son la G.653 y G.655, la señal en la fibra G.652 ha sufrido mucha degradación en su forma y su recuperación conllevaría errores.

Caso 7:

Potencia: $P_0=40\text{mW}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$.

Longitud de fibra: $L=20\text{km}$.

En la figura 2.133 se puede observar la evolución del pulso en las cinco categorías de fibras para estas condiciones.

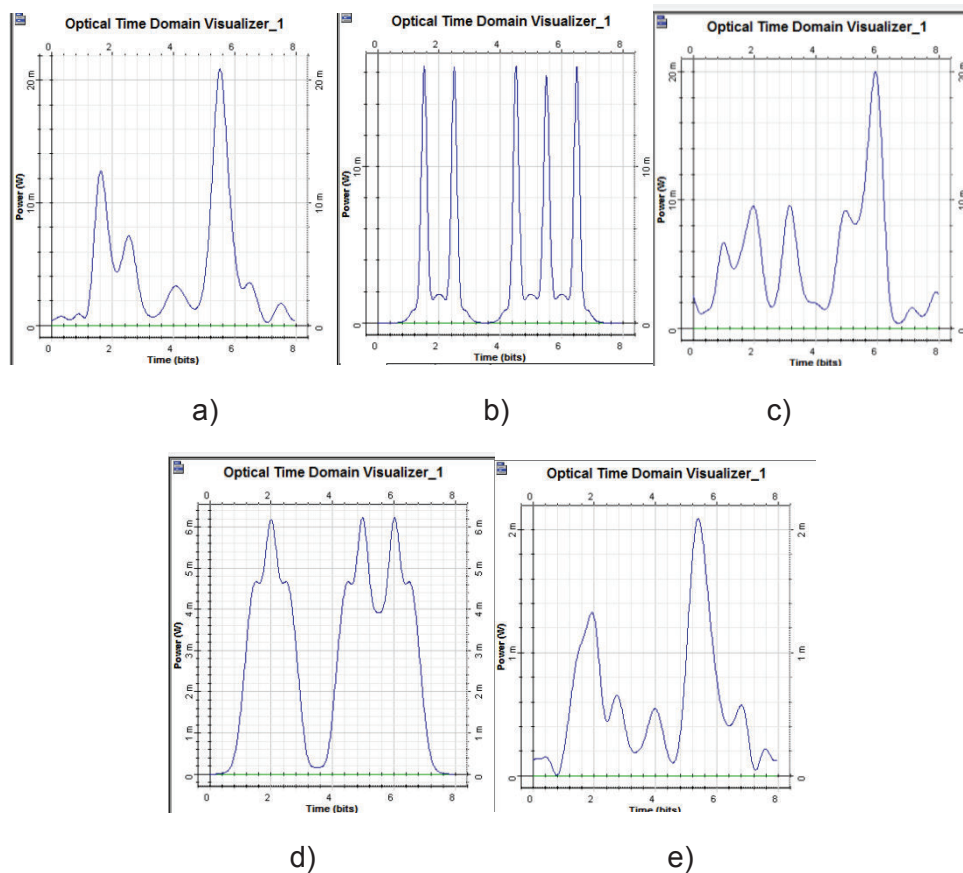


Figura 2. 133 comparativa de SPM para el caso 7, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

En la figura 2.133 se puede observar que al aumentar la potencia de transmisión y, trabajando en el régimen de dispersión anormal, existe una compresión del pulso par la fibra G.653.A, esto se debe al valor del coeficiente de dispersión de la misma, cabe recalcar que este es solo un caso particular ya que para determinar si un pulso

se comprime o no es necesario analizar la curva $\frac{T_L}{T_0}$, con los parámetros de transmisión y las características de cada fibra.

Caso 8:

Potencia: $P_0=40\text{mW}$.

Velocidad de transmisión: $V_t= 40\text{Gbps}$.

Longitud de fibra: $L=60\text{km}$.

En la figura 2.134 se puede observar la evolución de las señales:

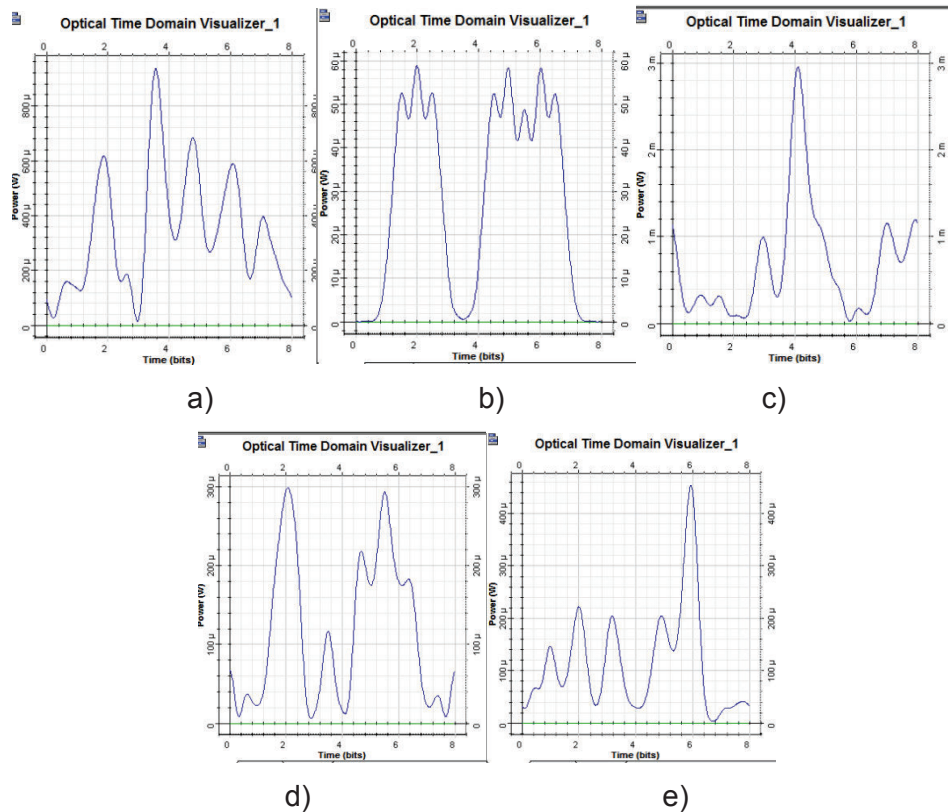


Figura 2. 134 comparativa de SPM para el caso 8, a) Fibra G.652, b) Fibra G.653.A, c) Fibra G.654.A, d) Fibra G.655.D, e) Fibra G.656

En estas condiciones y comparando con el caso 6, se puede observar que el impacto de SPM es significativo, en esta ocasión se debe a la alta potencia de transmisión.

Por este motivo la señal de la fibra G.655D una mayor degradación en su forma, es por ello que no es posible aumentar la potencia sin tener en cuenta el impacto de SPM.

2.5.1 FIBRAS ÓPTICAS UTILIZADAS EN EL MERCADO LOCAL

Como parte de este estudio se ha realizado una investigación en los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones locales, sobre el tipo de fibra óptica entre otros parámetros relevantes para el estudio, con el fin de determinar qué parámetros de transmisión en sus sistemas de comunicaciones ópticos se están utilizando y qué parámetros va a utilizar en un futuro, por motivos de confidencialidad verbales y escritos, los nombres de las empresas consultados no serán publicados en el presente documento.

Para obtener la información de estas operadoras locales se realizó una encuesta la misma que se la puede encontrar en el anexo B de donde se pueden sacar las siguientes conclusiones:

Actualmente los tipos de fibra más utilizados en el mercado son: G.652.D y G.655.C. La fibra G.652.D se utiliza en enlaces metropolitanos, en general la velocidad que utilizan en este tipo de fibra es de 10Gbps por canal, con un máximo de 80 canales en los sistemas WDM, esta fibra es usada principalmente por su bajo costo; mientras que la fibra G.655.C es utilizada en comunicaciones de grandes distancias, la mayor parte de operadores trabajan con 10Gbps, algunas operadoras ya poseen enlaces que operan a velocidades 40Gbps por canal en este tipo de fibra óptica utilizando 80 canales.

Algunas empresas de telecomunicaciones van a implementar sistemas de transmisión que operen a 100Gbps por canal, para esto van a utilizar mecanismos de modulación coherente, este es un esquema de modulación donde la componente de la señal que varía es la fase, por ejemplo la modulación QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), de esta manera los efectos temporales de GVD y SPM se eliminan [33].

La fibra de categoría G.653.C es utilizada con menor frecuencia y se suele ocupar en lugar de la fibra G.652.D, por otro lado las fibras de categorías G.654 y G.656 son las que menor uso tienen, al punto que la mayor parte de las empresas consultadas no las utilizan en absoluto. De esta manera se puede corroborar que el estudio presentado en este documento está acorde a la realidad de los sistemas que actualmente operan en la ciudad de Quito.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS Y PROPUESTA DE MECANISMOS REMEDIALES PARA SPM Y XPM

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones para determinar cuáles fueron los parámetros más importantes que dieron lugar a la aparición de fenómenos no lineales.

En base a estos resultados se presentarán mecanismos remediales para mitigar los efectos de SPM y XPM. Una vez propuestos dichos mecanismos se procederá a realizar las simulaciones respectivas para comprobar que en efecto el impacto de SPM y XPM es mitigado.

El resumen de todas las simulaciones realizadas se encuentran en el anexo A, donde el color naranja representa las situaciones en las que los efectos no lineales empiezan a manifestarse, es ahí donde se realizará el análisis para cada caso, puesto que, como se puede observar en el anexo se encuentran identificados claramente todos los parámetros y los valores tanto de la relación $\frac{T_L}{T_0}$ como la de $\varphi_{\text{máx}}$ que son los más significativos para el análisis de SPM y XPM.

En las siguientes secciones se analizarán los resultados para SPM y XPM con todas las consideraciones respectivas.

3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA SPM

En esta sección se realiza un análisis general, puesto que con las simulaciones realizadas es posible sacar conclusiones para todos los casos independientemente del tipo de fibra.

3.1.1 ANÁLISIS EN EL RÉGIMEN TEMPORAL

Los fenómenos no lineales empiezan a aparecer en velocidades de transmisión elevadas, en todos los casos estos efectos están directamente relacionados con la dispersión de cada fibra y la distancia.

Las distancias máximas a las que se puede transmitir sin problemas aumentan conforme aumenta la potencia de transmisión siempre y cuando la relación $\frac{T_L}{T_0}$ no sobrepase la unidad, este patrón se lo pudo observar en todas las fibras en donde al aumentar la potencia de transmisión, y trabajando en el régimen anormal de dispersión, conforme se aumenta la potencia, la distancia máxima de transmisión sin distorsión aumenta.

Los valores de la relación $\frac{T_L}{T_0}$ fueron: 1.04, 1.012, 1.01 en promedio (Anexo A) de todas las simulaciones realizadas, estos resultados indican que con un ensanchamiento del pulso mayor al 5% la forma de los pulsos empieza a degradarse, hay que tomar en cuenta que SPM no es el único fenómeno asociado sino, como se ha visto en el capítulo 1, SPM actúa conjuntamente con GVD.

Uno de los indicadores que permiten determinar si los efectos no lineales son de consideración es la relación entre la longitud de la fibra y la longitud no lineal L_{NL} , pues como se ha visto, si estas dos distancias son comparables o la longitud de la fibra es mayor a la longitud no lineal el fenómeno predominante es SPM, los efectos no lineales son apreciados y tienen un impacto significativo. Conforme se aumenta la velocidad de transmisión, la distancia a la que se puede propagar un pulso o un conjunto de pulsos sin sufrir degradación disminuye, de tal manera que, como se puede apreciar en el anexo A, a una velocidad de transmisión de 100Gbps la distancia de transmisión es muy limitada. En todos los casos nuestro indicador $\frac{T_L}{T_0}$ no sobrepasa el valor de 1.05.

3.1.2 ANÁLISIS EN EL RÉGIMEN ESPECTRAL

Al aumentar la potencia de transmisión de acuerdo con la curva $\frac{T_L}{T_0}$, existe una compresión del pulso inicial, sin embargo la longitud no lineal disminuye y el valor de $\varphi_{\text{máx}}$ aumenta, lo que ocasiona una deformación en el espectro de la señal, este último parámetro no es relevante para potencias de transmisión menores a 20mw.

Como se puede apreciar en las simulaciones en la longitud de onda de 1550nm, para la fibra G653, no se tuvo presencia de SPM ni GVD puesto que la dispersión es cero para esta fibra a esta longitud de onda; sin embargo como hemos visto, dependiendo de la potencia de transmisión SPM modifica el espectro del pulso por lo que inclusive cuando tenemos dispersión cero, si la potencia de transmisión es lo suficientemente alta, el factor de $\varphi_{\text{máx}}$ se vuelve significativo.

El programa implementado en MATLAB ayuda con el cálculo del mismo cuyo resultado se ve reflejado en el espectro de la señal.

Con este análisis se presentan mecanismos remediales con sus respectivas limitaciones tanto temporalmente como espectralmente en las secciones 3.3 y 3.4.

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA XPM

En todas las simulaciones realizadas para XPM se pudo observar que para separaciones entre canales superiores o iguales a 100GHz y con potencias de transmisión no superiores a los 20mW, el impacto de XPM es insignificante, siendo SPM y GVD los fenómenos predominantes en el ensanchamiento del pulso.

En los casos donde la separación entre canales es menor a 100GHz, el impacto de XPM empieza a ser significativo para potencias elevadas, debido a que XPM agrava el efecto de SPM esto ocasiona que el espectro de cada señal se ensanche dando a la postre como resultado una interferencia entre canales. Este fenómeno se lo puede observar en potencias de transmisión superiores a los 60mW.

Existe una relación muy estrecha entre los fenómenos de SPM y XPM, debido a que XPM agrava los efectos de SPM, si en un sistema hay presencia de este último XPM tiene que ser considerado en el peor de los casos, como se vio en el capítulo 2, el efecto de XPM será el doble del de SPM.

Por otro lado si el efecto de SPM es muy reducido el de XPM también lo será, y en un caso ideal si SPM no existe XPM tampoco existirá, por este motivo los mecanismos remediales para XPM serán la combinación de los mecanismos para mitigar SPM y XPM.

3.3 MECANISMOS REMEDIALES PARA SPM

3.3.1 AUMENTO DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN

Si bien es cierto que SPM está directamente relacionado con la potencia de transmisión, una solución es aumentar la potencia del pulso bajo determinadas condiciones, es necesario tomar en cuenta que SPM no actúa solo, sino que actúa conjuntamente con GVD.

Para poder realizar esto es necesario tener algunas consideraciones presentes:

- a) La potencia de transmisión en ningún caso puede ser mayor a un límite definido por la relación $\frac{T_L}{T_0}$, esto es, aumentar la potencia sin que el valor de dicha relación sobrepase la unidad. De esta forma se puede asegurar que el pulso se va a comprimir y por tanto mitigar el ensanchamiento ocasionado por GVD, es decir en estas circunstancias SPM contrarresta el efecto de GVD.

A continuación se analizará el caso 5.1 presentado en la sección 2.3.1.1 del capítulo 2 el cual corresponde a la figura 2.32.

Como se pudo observar en la figura 2.32 en una distancia de 21 km y una velocidad de transmisión 60Gbps ya existe presencia de efectos no lineales.

La relación $\frac{T_L}{T_0}$ presentada en este caso es de 1.01, por tanto se procederá a aumentar la potencia del pulso para observar cómo cambia el valor y la curva de dicha relación.

Con una potencia de 40mW obtenemos el siguiente resultado:

$$\frac{T_L}{T_0} = 0.84$$

Este resultado indica que el pulso se comprime un 16%, a continuación se realizará una comparación entre las curvas de la relación $\frac{T_L}{T_0}$ para determinar cómo varían, De esta forma se podrá predecir cómo evolucionará el pulso en esta nueva condición; las curvas en el software utilizado son las siguientes:

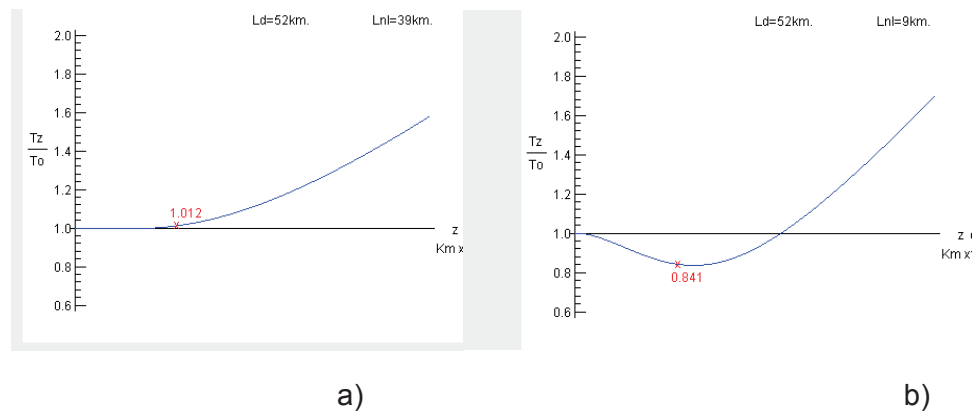


Figura 3. 1 Resultado de las curvas $\frac{T_L}{T_0}$ para el caso de $P_0=10\text{mW}$ (a), y para $P_0=40\text{mW}$ (b)

Donde $\frac{T_L}{T_0} = \frac{T_z}{T_0}$, en estas condiciones se puede notar que la curva ahora tiene un pico negativo, esto significa que el pulso se comprime hasta un máximo, como veremos en la siguiente figura la forma del pulso mejora notablemente al aumentar la potencia. A continuación se presentan dos figuras la primera es el pulso con una potencia de 10mW y la segunda es el pulso con una potencia de 40mW:

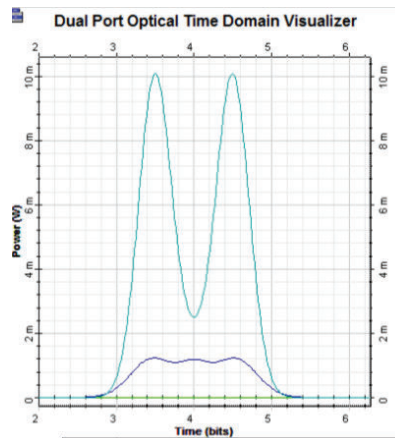


Figura 3. 2 Forma del pulso con las condiciones del caso 5.1 sección 2.3.1.1 para $\lambda=1525\text{nm}$ y $P_0=10\text{mW}$, la línea celeste corresponde a la señal inicial y la línea azul a la señal final.

En la figura 3.2 se puede observar cómo ha cambiado la forma de la señal, la línea verde representa la señal inicial antes de propagarse por la fibra óptica, y la línea azul la señal luego de haber recorrido toda la fibra óptica, en estas condiciones la señal todavía se puede recuperar puesto que su degradación no es significativa.

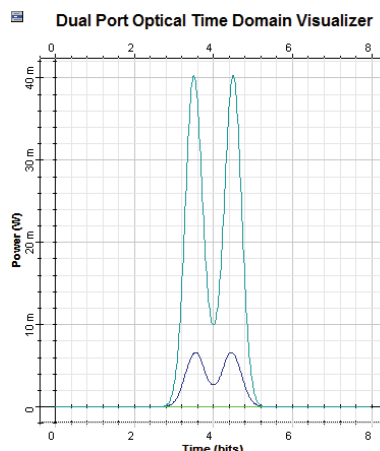


Figura 3. 3 Forma del pulso con las condiciones del caso 5.1 sección 2.3.1.1, para $\lambda=1525\text{nm}$ aumentando la potencia a $P_0=40\text{mW}$. La línea celeste corresponde a la señal inicial y la línea azul a la señal final.

Se puede apreciar en las figuras claramente las ventajas de aumentar la potencia, sin embargo como se mencionó existen límites. Una vez más aumentamos la potencia, esta vez a 200mW . La curva de la relación $\frac{T_L}{T_0}$ obtenida en este caso se presenta a continuación:

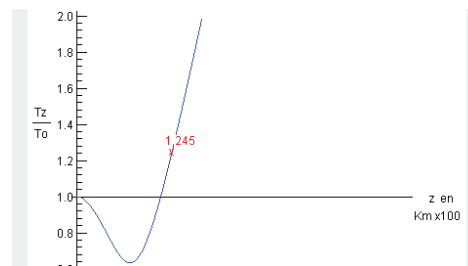


Figura 3. 4 Resultado de la curva para el caso de $P_0=200\text{mW}$

Se puede observar que la relación tiene un valor considerablemente mayor en este caso 1.24, esto significa que el pulso dejó de comprimirse y se empezó a ensanchar, como al aumentar la potencia la pendiente de ensanchamiento aumenta, la forma del pulso se pierde rápidamente, la siguiente figura muestra la forma del pulso en estas condiciones:

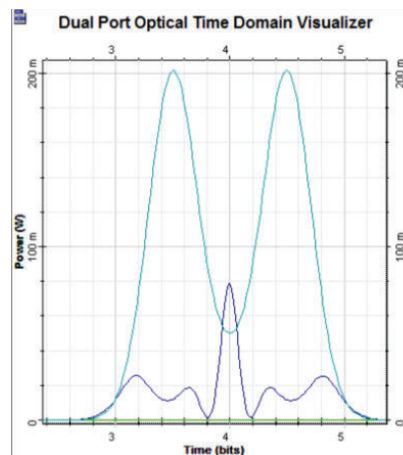


Figura 3. 5 Forma del pulso con las condiciones del caso 5.1 sección 2.3.1.1, para $\lambda=1525\text{nm}$ aumentando la potencia a $P_0= 200\text{mW}$, la línea celeste corresponde a la señal inicial y la línea azul a la señal final.

Por lo tanto este mecanismo remedial se encuentra limitado hasta cierto nivel de potencia.

- b) También es necesario tomar en cuenta el valor del factor de $\phi_{\text{máx}}$, puesto que al aumentar la potencia del pulso este valor aumenta, como hemos visto con un valor mayor a π la forma del espectro se ve comprometida.

Para analizar esta limitación revisaremos el caso 2.4 de la sección 2.3.1.1 para una longitud de onda de 1525nm visto en el capítulo 2:

Se puede observar que a pesar de que la señal es recuperable nuevas componentes de frecuencia aparecieron, esto es debido a SPM y a la potencia utilizada. Primero analizaremos en el siguiente gráfico la curva de la relación $\frac{T_L}{T_0}$:

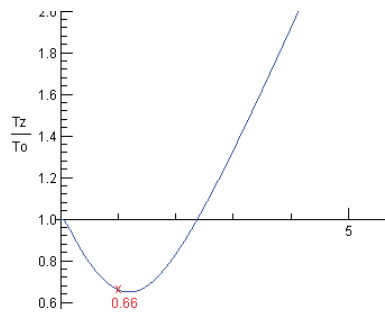


Figura 3. 6 Resultado de la curva para el caso 2.4 de la sección 2.3.1.1 para $\lambda=1525\text{nm}$

Se puede observar que la curva indica una compresión del pulso, sin embargo el programa implementado indica que el factor $\phi_{\text{máx}}$ es de 1.05π , esto quiere decir que la forma del espectro cambia esto puede observarse en la figura 2.26. En el siguiente gráfico se muestra el 2.4 de la sección 2.3.1.1 para 1525nm con una potencia de 150mW, la curva resultante es la siguiente:

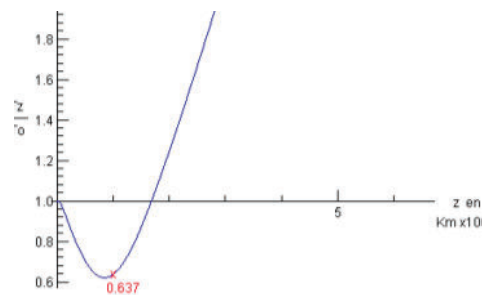


Figura 3. 7 Resultado de la relación $\frac{T_L}{T_0}$ para $\lambda=1525\text{nm}$ con $P_0= 150\text{mW}$

Se puede observar que el pulso se comprime, el valor de $\frac{T_L}{T_0}$ es ahora 0.63, pero esto es únicamente en el dominio temporal, el factor crítico es $\phi_{\text{máx}}$, el cual es resultado únicamente de SPM, en otras palabras SPM es el fenómeno principal en este caso.

A continuación se presenta el resultado de la simulación para un solo pulso para poder observar el impacto sobre el pulso tanto temporalmente como espectralmente:

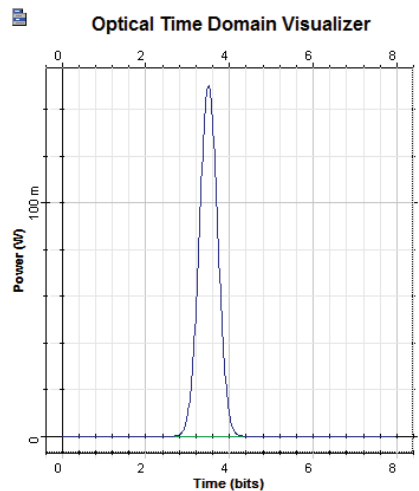


Figura 3. 8 Forma del pulso incidente para el 2.4 de la sección 2.3.1.1

En la figura 3.8 se puede observar el pulso inicial antes de propagarse por la fibra óptica, este corresponde a la secuencia de bits 0001000, se ha tomado esta secuencia para observar claramente los cambios de forma en un solo pulso.

El resultado de la simulación en estas condiciones se presenta en la siguiente figura:

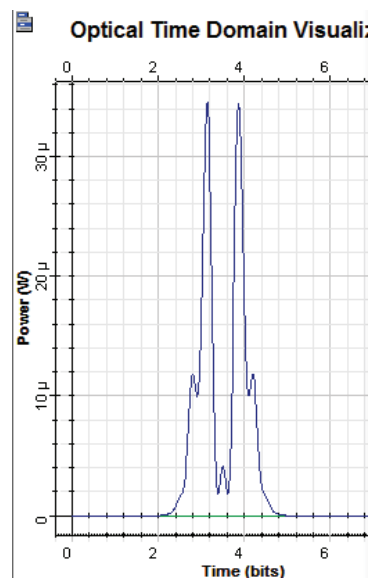


Figura 3. 9 Forma del pulso con las condiciones del caso 2.4 de la sección 2.3.1.1, aumentando la potencia a 150mW

En la figura 3.9 se puede observar cómo ha cambiado la forma del pulso visto en la figura 3.8, al ser propagado a través de la fibra con una potencia inicial de 150mW.

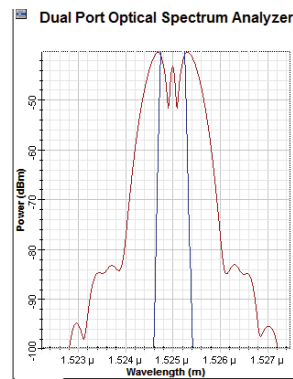


Figura 3. 10 Espectro del pulso con las condiciones del caso 2.4 de la sección 2.3.1.1, aumentando la potencia a 150mW

En la figura 3.10 se puede observar una degradación total del espectro del pulso, a continuación se presentan los resultados del software implementado:

```
relaciontemporal =
    0.6369

phimax =
    1.5606
```

Figura 3. 11 Resultado del software implementado para las condiciones del caso 2.4 de la sección 2.3.1.1, aumentando la potencia a **150mW**

Se puede observar en la figura 3.11 que el valor de $\varphi_{\text{máx}}$ aumentó a 1.56π , por lo tanto para considerar el aumento de potencia como mecanismo remedial es necesario tomar en cuenta estas dos características, puesto que SPM no solo afecta temporalmente a los pulsos sino también espectralmente.

Nota: En el caso de que los problemas de SPM sean ocasionados por una potencia de transmisión elevada, el mecanismo remedial en esas condiciones es bajar la potencia de transmisión y, de requerir un determinado nivel de potencia en el receptor es necesario utilizar un amplificador intermedio.

3.3.2 USO DE FIBRA DCF (FIBRA COMPENSADORA DE DISPERSIÓN)

Como se ha visto hasta aquí, el aumento de la velocidad de transmisión limita la distancia máxima que puede tener una fibra de transmisión sin regeneradores. Una

forma de mitigar el impacto que tiene SPM y GVD es la utilización de fibras DCF (*Dispersion Compensating Fiber*). Este tipo de fibras tiene un coeficiente de dispersión de signo contrario a la fibra de transmisión utilizada y tiene un valor de dispersión mayor.

El siguiente caso presenta las condiciones en las cuales los efectos no lineales son apreciados.

Caso 1

Velocidad de transmisión: $V_t = 40\text{Gbps}$

Longitud de fibra: $L = 25\text{km}$.

Potencia de transmisión: $P_0 = 10\text{mW}$.

Tipo de fibra: G655.D.

Señal inicial:

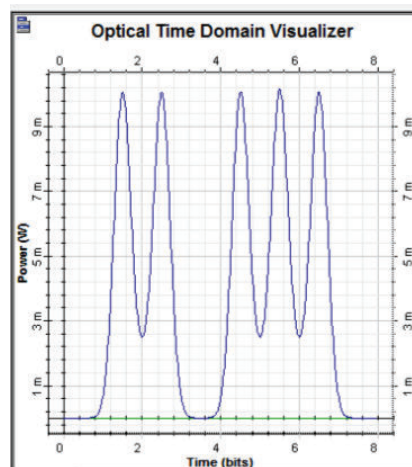


Figura 3. 12 Señal inicial para comprobación de mecanismo remedial usando fibras DCF

El resultado de la simulación en estas condiciones es el siguiente:

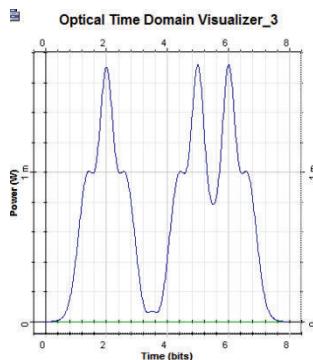


Figura 3. 13 Resultado de la simulación para SPM, con $V_t=40\text{Gbps}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$

Se puede observar que ya existe una degradación considerable de la señal. El mecanismo remedial propuesto consiste en utilizar una fibra DCF luego de un pequeño tramo del enlace, la longitud de esta fibra es pequeña en la práctica, sin embargo se utilizarán longitudes de fibra DCF para ilustrar de manera significativa su impacto.

Mecanismo remedial para el caso 1

En este caso se utiliza una fibra cuyo coeficiente de dispersión es -10ps/nm.km en una distancia de 5 kilómetros de la siguiente manera:

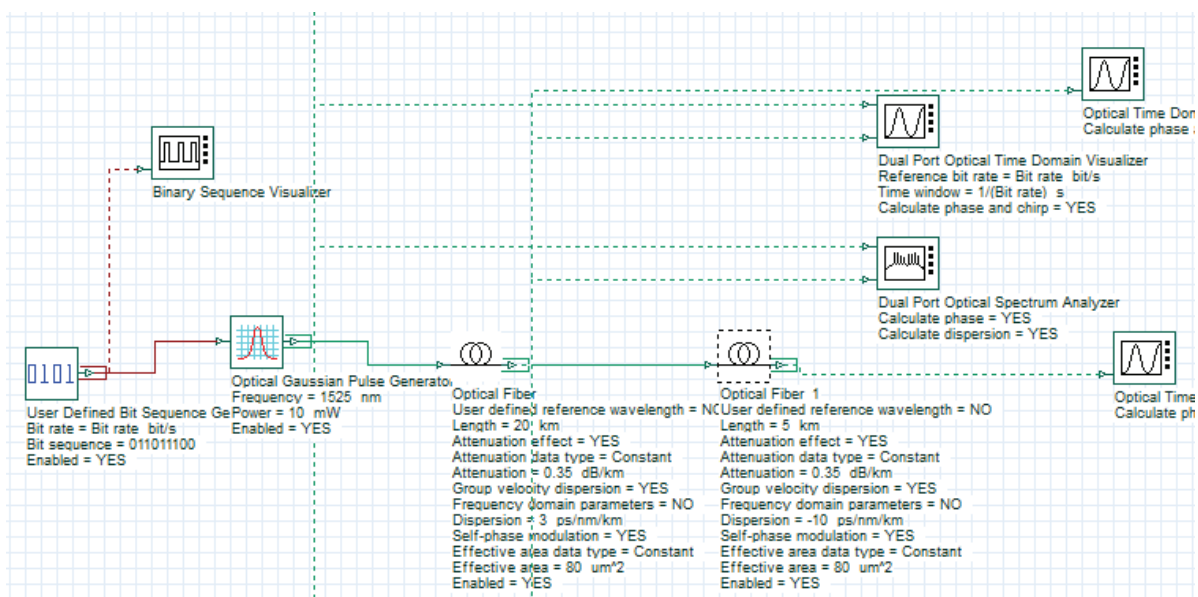


Figura 3. 14 Diagrama de transmisión utilizando fibra DCF

En la figura 3.14 se puede observar que se ha añadido un tramo de fibra adicional denominado “Optical Fiber 1” esta corresponde a la fibra DCF. De esta manera la dispersión que tiene la fibra positiva inicialmente, ahora en el tramo de 5km tendrá una dispersión negativa de un valor muy alto, lo que reduce la dispersión acumulada en la señal a lo largo de los 20km de la fibra. El resultado es el siguiente para las mismas condiciones anteriormente vistas:

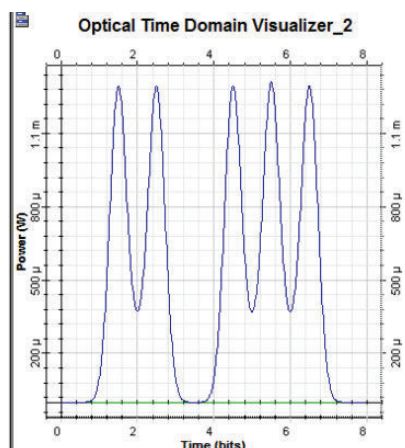


Figura 3. 15 Resultado de la simulación para SPM utilizando fibra DCF, con $V_t= 40\text{Gbps}$, 3ps/nm.km de dispersión, $P_0=10\text{mW}$

Se puede observar en la figura 3.15 que la señal ha recuperado su forma original.

Caso 2

Este mecanismo ayuda a aumentar significativamente la distancia máxima de transmisión sin utilizar regeneradores, para este caso a manera de análisis se ha aumentado la distancia a 50km y se han insertado dos fibras DCF de 5km la primera ubicada en la mitad de la longitud de la fibra (20km) y la segunda al extremo final de la fibra (45km) de la siguiente manera:

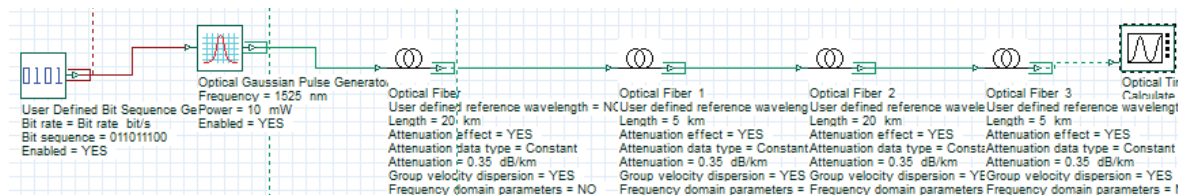


Figura 3. 16 Diagrama de transmisión utilizando fibra DCF a una distancia de 50km

Teniendo como resultado de la simulación en estas condiciones la siguiente imagen:

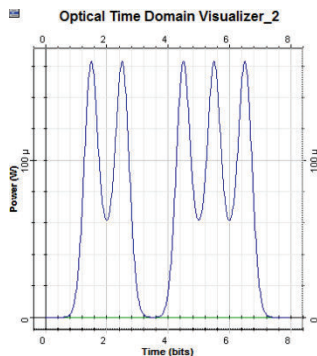


Figura 3. 17 Resultado de la simulación para SPM utilizando fibra DCF en varias secciones, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=10\text{mW}$

En la figura 3.17 se puede observar que la señal ha recuperado su forma original gracias a la compensación de la dispersión realizada.

Caso 3

Para el siguiente ejemplo se va analizar este mecanismo remedial en un sistema WDM cuyo diagrama es el siguiente:

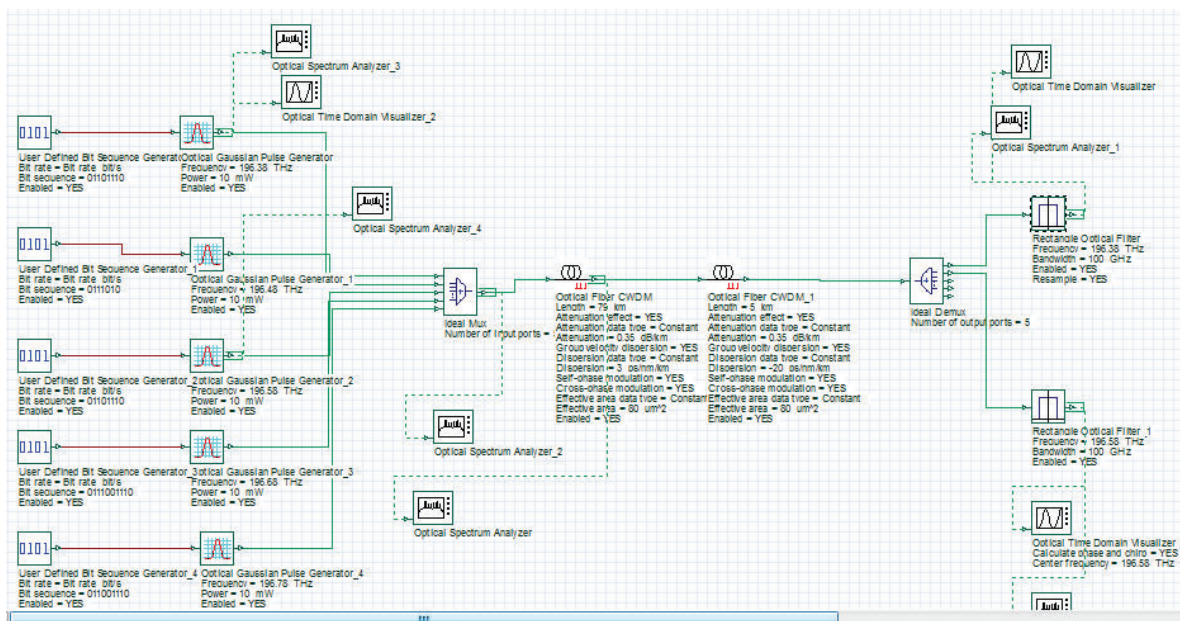


Figura 3. 18 Diagrama de simulación para XPM utilizando fibras DCF

En la figura 3.18 se puede observar el diagrama de simulación de un sistema WDM utilizando una fibra DCF.

Datos:

Velocidad de transmisión: $V_t = 40\text{Gbps}$

Longitud de fibra: $L = 25\text{km}$

Potencia de transmisión: $P_0 = 10\text{mW}$.

Tipo de fibra: G655.D.

Separación entre canales: 100GHz .

Señal inicial para la longitud de onda central de 1550nm se muestra en la figura 3.19, esta corresponde a la secuencia de bits: 0110111, se ha tomado esta secuencia para observar la evolución de la señal en el caso de tener pulsos consecutivos.

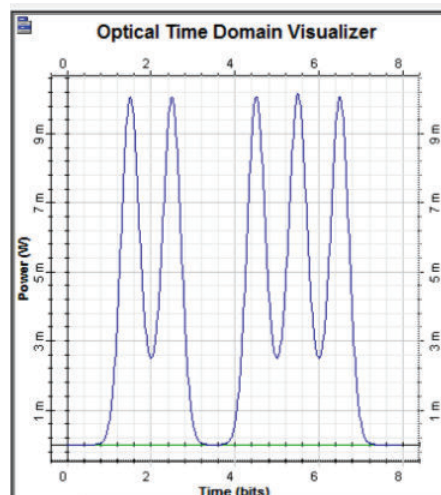


Figura 3. 19 Señal inicial para comprobación de mecanismo remedial usando fibras DCF para $\lambda = 1550\text{nm}$

Señal inicial para la longitud de onda inferior de 1523.49nm :

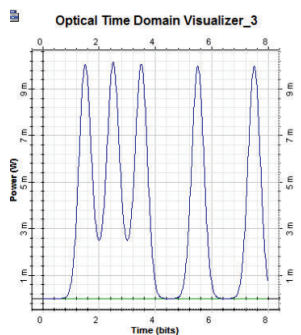


Figura 3. 20 Señal inicial para comprobación de mecanismo remedial usando fibras DCF para $\lambda=1523.49\text{nm}$

Sin utilizar fibra DCF se tiene el siguiente resultado:

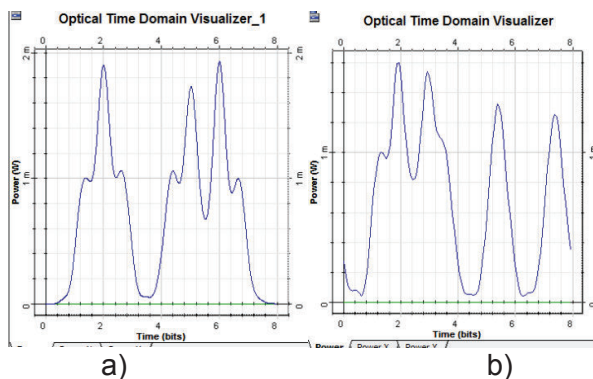


Figura 3. 21 Resultado de WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, longitud de onda central (a), longitud de onda inferior (b)
Se puede observar que las dos señales analizadas han sufrido cambios en su forma debido a SPM y GVD; como sabemos por la potencia utilizada y la gran separación entre canales XPM este cambio no es significativo.

Al usar la fibra DCF en los últimos 5km se obtiene:

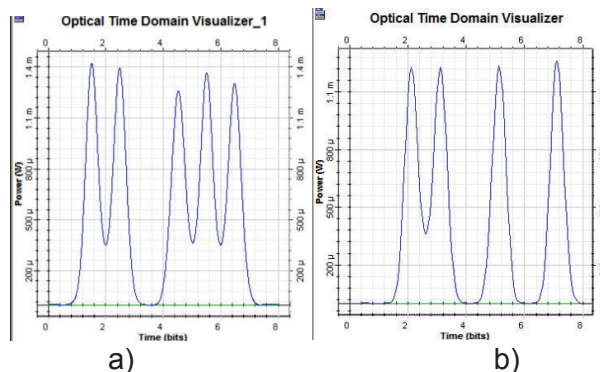


Figura 3. 22 Resultado de la simulación utilizando fibra DCF en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, (a) longitud de onda central, (b) longitud de onda inferior

Se puede observar que las señales han recuperado su forma original, de esta manera es posible realizar transmisiones de largo alcance sin la utilización de regeneradores; la única consideración, dependiendo del sistema en donde se implementará, es la potencia requerida, para lo cual eventualmente será necesaria la utilización de amplificadores que compensen las pérdidas de la fibra de transmisión y las de la fibra DCF que suelen tener elevada atenuación.

3.3.2.1 Consideraciones de este mecanismo remedial:

Como se ha visto la fibra DCF ayuda considerablemente a mitigar los efectos de SPM y GVD, pero hay que tomar en cuenta que esto solo es factible cuando la potencia de transmisión es pequeña. Al aumentar la potencia de transmisión los efectos de SPM y más concretamente los relacionados con el parámetro $\phi_{\text{máx}}$, no pueden ser mitigados con este mecanismo remedial. Esto se debe a que SPM en potencias elevadas modifica el espectro de la señal y la fibra DCF ayuda a remediar las distorsiones temporales.

La siguiente imagen muestra el caso 1 aumentando la potencia a 400mW, este valor se lo ha tomado únicamente para ilustrar claramente el cambio que sufre la señal debido a SPM:

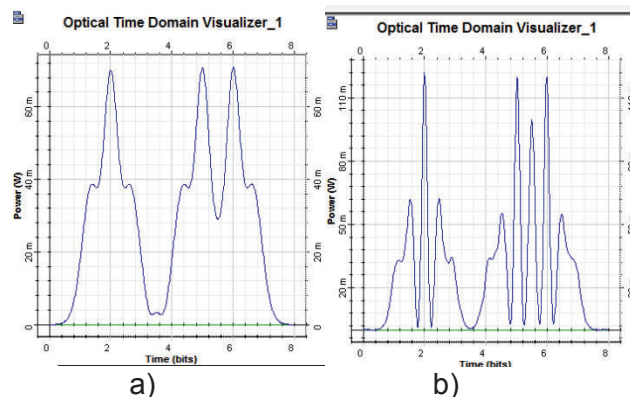


Figura 3. 23 Resultado de la simulación para SPM, con $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{km}$. a) En ausencia de SPM, b) con SPM incluido.

En la figura 3.23(a) se puede visualizar el comportamiento de la señal en ausencia de SPM, se observa que el único fenómeno es el producido por GVD y con una fibra

DCF estaría mitigado el efecto del mismo. Sin embargo en la figura (b) se puede observar cómo SPM ha degradado la señal y al utilizar una fibra DCF el resultado es el siguiente:

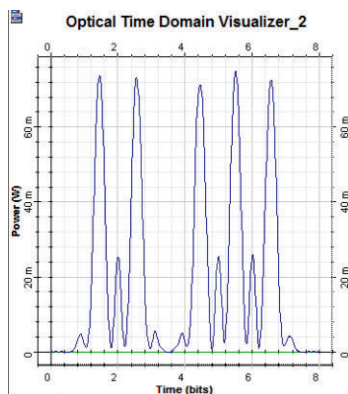


Figura 3. 24 Resultado de la simulación para SPM utilizando fibra DCF, con $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{km}$

Se puede observar que se ha reducido el impacto de GVD y SPM en el régimen temporal sin embargo SPM ocasiona una distorsión de la señal, en este caso no es muy significativo debido a que la señal se puede recuperar, los cambios espectrales se los puede apreciar en la siguiente figura:

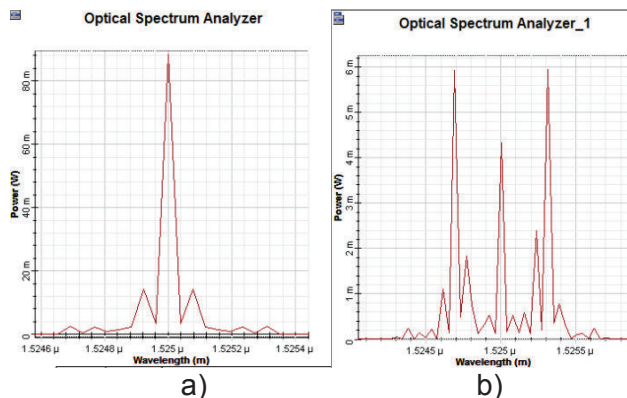


Figura 3. 25 Resultado del espectro utilizando fibra DCF, con $V_t=40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{km}$. a) señal inicial, b) señal final

En la figura 3.25(a) se puede visualizar el espectro inicial de la señal y en la figura (b) el impacto que ha tenido SPM en el espectro. Se puede observar un ensanchamiento espectral y la aparición de nuevas componentes de frecuencia, este mismo caso se analizará para el mismo sistema WDM visto anteriormente en esta sección (caso 3).

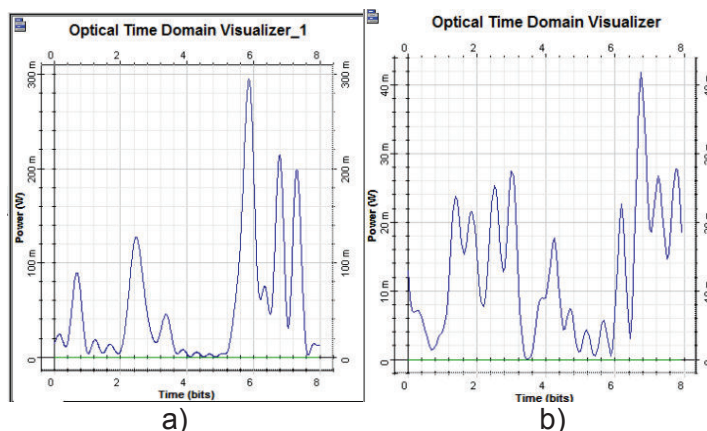


Figura 3. 26 Resultado de la simulación para WDM utilizando fibra DCF, con $V_t= 40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0= 400\text{mW}$, $L= 25\text{Km}$, $\Delta f= 100\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$

Se puede observar en la figura 3.26 el resultado para las dos señales, la primera (a) corresponde a la longitud de onda central y la segunda (b) a la longitud de onda inferior. El impacto que ha tenido SPM y XPM en las señales ha sido muy significativo, esto se debe a que el ensanchamiento espectral producido por SPM provoca que los espectros de las señales aledañas se superpongan, y XPM hace que este efecto se agrave. Para poder observar cómo ha cambiado la forma del espectro de cada señal y visualizar el impacto que tienen las nuevas componentes de frecuencia que aparecen, como resultado de las no linealidades presentes, se muestra la siguiente figura correspondiente al espectro de todas las señales en el sistema WDM que se han utilizado para esta simulación:

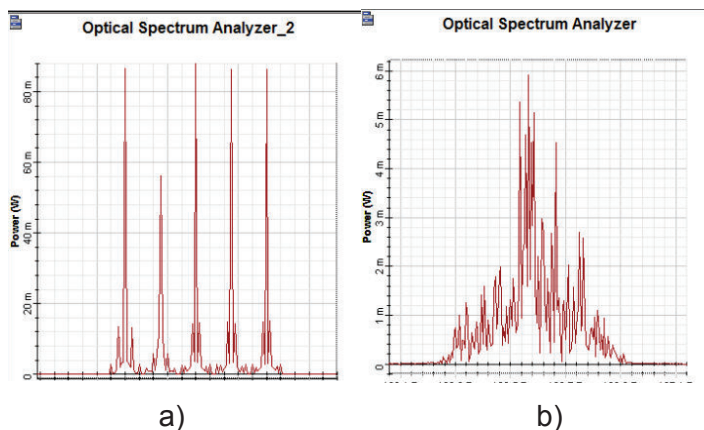


Figura 3. 27 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps , $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{Km}$, $\Delta f= 100\text{GHz}$

Se puede observar que las señales se han superpuesto y el espectro ha sido muy degradado para cada canal.

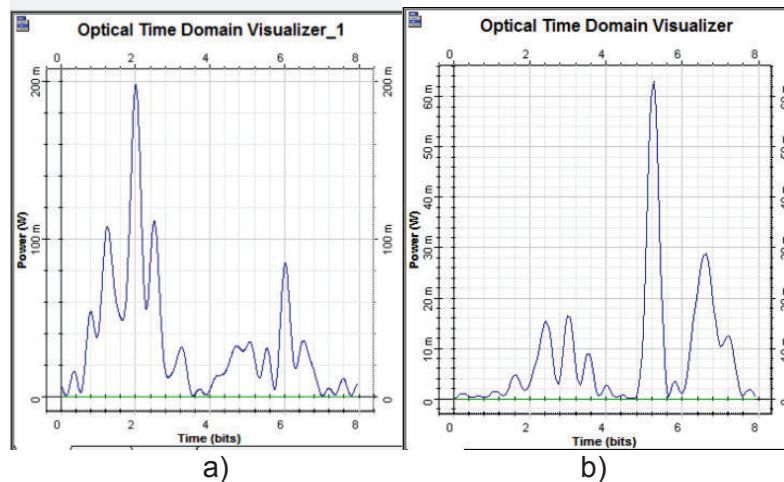


Figura 3. 28 Resultado del espectro en WDM utilizando fibra DCF, con $V_t= 40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{Km}$, $\Delta f= 100\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$

La figura 3.28 muestra el resultado de simulación utilizando fibra DCF. Como se observa la señal ya no es recuperable a pesar de que la fibra DCF mitiga el efecto temporal de SPM y GVD, los efectos espectrales de SPM y XPM a nivel espectral son predominantes.

3.4 MECANISMOS REMEDIALES PARA XPM

3.4.1 AUMENTO EN LA SEPARACIÓN ENTRE CANALES Y UTILIZACIÓN DE FIBRAS DCF

En todos los casos se ha visto que cuanto menor es la separación entre canales, mayor es el impacto de XPM. Es por eso que el primer mecanismo remedial es la combinación de: aumento de separación entre canales y el uso de una fibra DCF.

En la figura 3.23 se observa que la señal ha sido degradada considerablemente, en estas condiciones y aumentando la separación entre canales a 350GHz (se ha tomado este valor por motivo de análisis únicamente) tenemos el siguiente resultado:

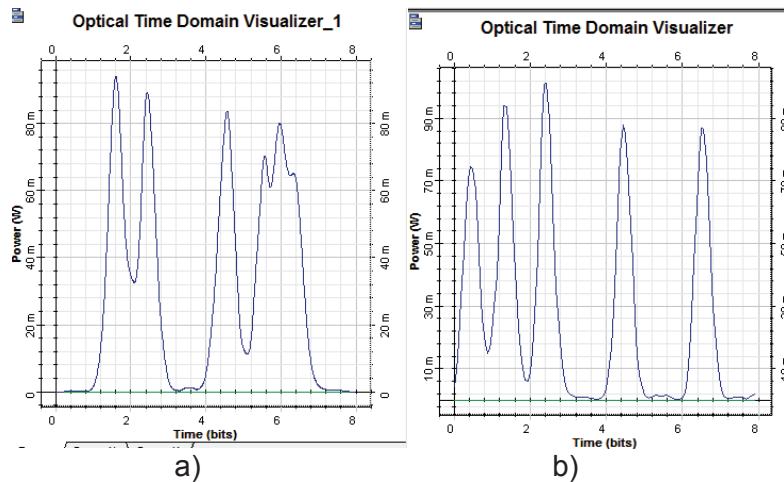


Figura 3. 29 Resultado de aumentar la separación entre canales en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=350\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$

Se puede observar en la figura 3.29 que la señal ha mejorado considerablemente, y se puede recuperar la señal sin problemas, la figura 3.29(a) corresponde a la señal en la longitud de onda central, y la (b) a la longitud de onda inferior, Para analizar cómo ha sido modificado el espectro de todas las señales involucradas en el sistema WDM se muestra en la siguiente imagen el espectro de las señales en su conjunto, en donde se puede identificar cada señal y su ensanchamiento espectral.

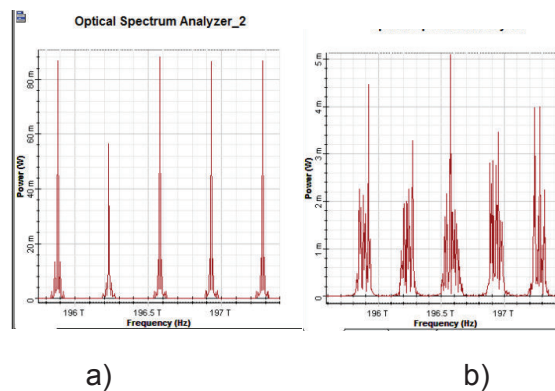


Figura 3. 30 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=350\text{GHz}$. a) señal inicial, b) señal final

Se puede observar en la figura 3.30 que los efectos de SPM y XPM han ensanchado el espectro de los pulsos, en estas condiciones los espectros ya no se superponen por lo que los cambios en la forma del pulso están relacionados a los valores de $\varphi_{\text{máx}}$,

los cuales son resultado únicamente de la contribución conjunta de SPM y XPM; siendo SPM, por la separación entre canales, el efecto predominante. Utilizando una fibra DCF al igual que se utilizó en la figura 3.26 obtenemos el siguiente resultado:

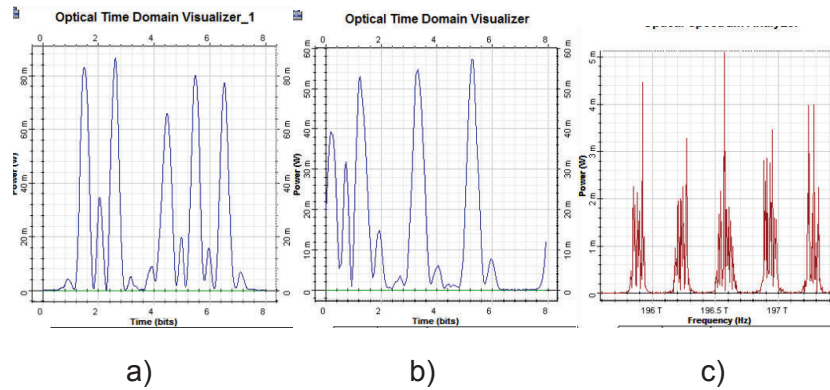


Figura 3. 31 Resultado del espectro en WDM utilizando fibra DCF, con $V_t= 40\text{Gbps}$, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{Km}$, $\Delta f= 350\text{GHz}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$, c) espectro

En la figura 3.31 (a) corresponde a la señal en la longitud de onda central, y la (b) a la longitud de onda inferior. Se puede observar que los efectos temporales han sido mitigados casi en su totalidad, sin embargo los efectos de SPM y XPM espectrales se mantienen.

Por tanto la combinación de estos dos mecanismos remediales ayuda a mejorar la transmisión de las señales.

3.4.2 AUMENTO DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN Y SEPARACIÓN ENTRE CANALES

Como se observó en SPM, aumentar la potencia de transmisión en ciertas condiciones ayuda a mitigar los efectos de SPM y GVD, sin embargo esto no es suficiente cuando tenemos un sistema WDM con una separación entre canales muy reducida.

Para observar este mecanismo remedial se utilizará el caso 3 visto anteriormente, en estas condiciones aumentamos la potencia a 100mW (tomando en cuenta las

consideraciones del primer mecanismo remedial para SPM) obteniendo el siguiente resultado:

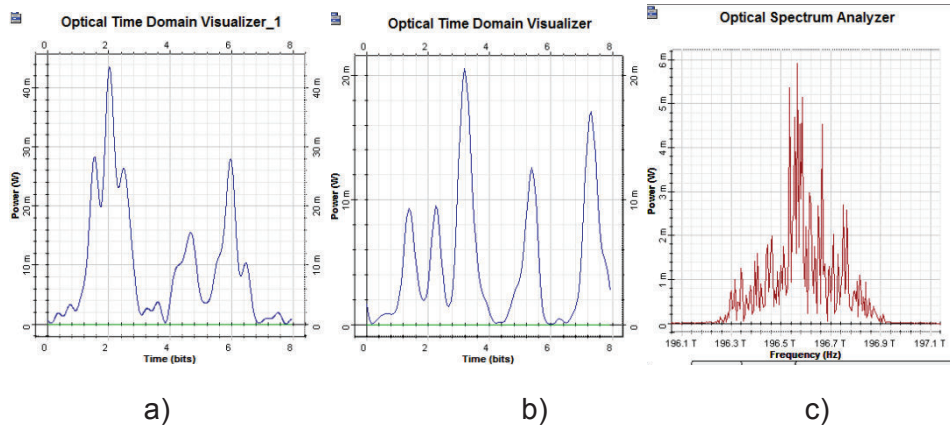


Figura 3. 32 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{Km}$, $\Delta f= 100\text{GHz}$, $P_0=100\text{mW}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$, c) espectro

Se puede observar en la figura 3.32 que la señal ha mejorado, sin embargo debido al ensanchamiento espectral existe una distorsión en las señales, por lo que se aumenta la separación entre canales a 200GHz:

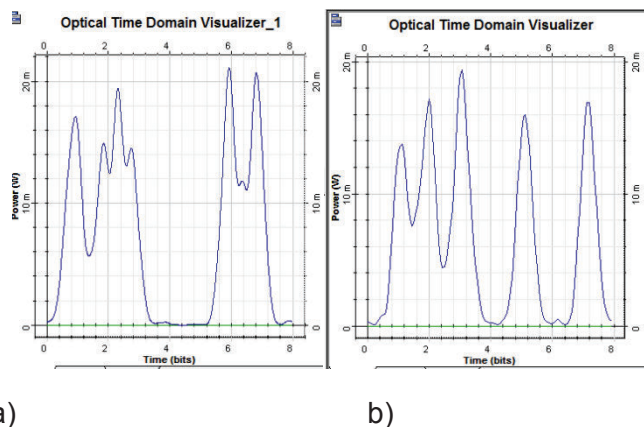


Figura 3. 33 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L= 25\text{Km}$, $\Delta f= 200\text{GHz}$, $P_0=100\text{mW}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$

Se puede observar en la figura 3.33 que la señal ha mejorado considerablemente. Este mecanismo remedial depende de cada sistema de transmisión, es posible mejorar la señal únicamente aumentando la potencia de transmisión, el siguiente gráfico muestra, la señal resultante con una potencia inicial de 40mW:

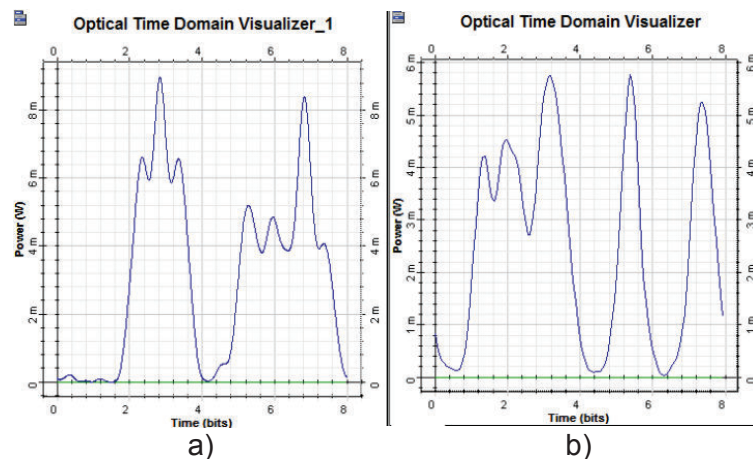


Figura 3. 34 Resultado del espectro en WDM, velocidad de transmisión 40Gbps, $D(\lambda)=3\text{ps/nm.km}$, $P_0=400\text{mW}$, $L=25\text{Km}$, $\Delta f=100\text{GHz}$, $P_0=40\text{mW}$. a) $\lambda=1523.49\text{nm}$, b) $\lambda=1523.49\text{nm}$

Se observa en la figura 3.34 un mejoramiento significativo de la señal, sin aumentar la separación entre canales, en estas condiciones es posible recuperar la señal sin complicaciones.

Estos mecanismos remediales se pueden aplicar en cualquier tipo de fibra, en el caso que se requiera aumentar la velocidad de transmisión considerablemente y dependiendo de parámetros de transmisión y de la fibra utilizada será necesario plantear la sustitución de la fibra, como es el caso de la fibra G.652 la cual se vio no es idónea para velocidades de transmisión superiores a los 40Gbps.

3.4.2 SEPARACIÓN ENTRE CANALES VARIADA

En esta sección se revisará el efecto que tiene variar la separación entre canales en un mismo sistema WDM. Para esto se ha considerado el caso 2 de la sección 2.4.3 con una separación entre canales que varía de 50GHz a 100GHz, los parámetros para la simulación son los siguientes:

Separación entre canales: $\Delta f=50\text{GHz}$ y 100GHz

Velocidad de transmisión: $V_t=10\text{Gbps}$.

Distancia: $L=1\text{km}$

Coefficiente de dispersión cromática: $D(\lambda)=8\text{ps/nm.km}$.

Frecuencia para cada canal: 192.8THz, 192.85THz, 192.90THz, 192.95THz, 193THz, 193.05THz, 193.15THz, 193.20THz, 193.25THz, 193.35THz, 193.40THz, 193.45THz, 193.55THz, 193.60THz

En la siguiente figura se puede apreciar los resultados de la simulación para las dos longitudes de onda laterales y 4 longitudes de onda intermedias:

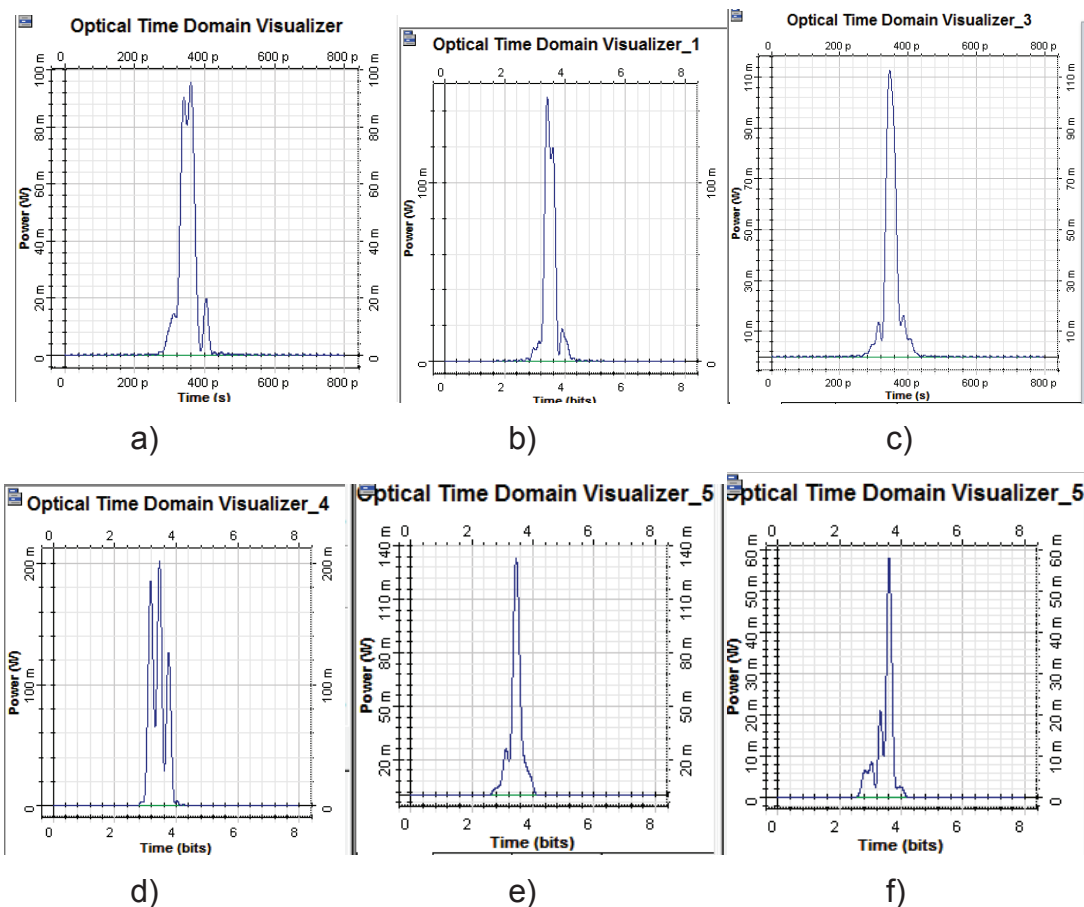


Figura 3. 35 Resultado de simulación para diferentes separaciones entre canales. a) 193THz b) 192.8THz c) 192.9THz d) 193.3THz e) 193.4THz f) 193.60THz

Se puede observar que con respecto al caso 2 de la sección 2.4.3 la forma de las señales ha mejorado por lo tanto tener un espaciado variado de longitudes de onda ayuda a mitigar el impacto de los efectos no lineales. En la siguiente figura se puede observar el espectro resultante en estas condiciones:

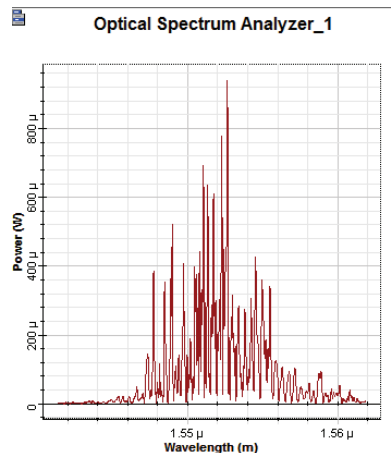


Figura 3. 36 Espectro de señal WDM para diferentes separaciones entre canales

En la figura 3.36 se puede observar que el espectro de la señal que no ha recuperado su forma con este mecanismo remedial, sin embargo, como se observa la figura 3.35 existe una mejoría en la forma de los pulsos. Este mecanismo remedial está relacionado con el propuesto en la sección 3.4.1, puesto que al aumentar la separación entre canales (aunque sea de forma parcial como es este caso) mitiga el impacto de XPM, siendo el principal causante la alta potencia.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Para determinar si los efectos no lineales son de consideración tenemos que tomar en cuenta algunos parámetros que ayudan a cuantificar si los efectos no lineales serán significativos; por ejemplo la distancia no lineal L_{NL} , $\varphi_{\text{máx}}$, relación temporal $\frac{T_L}{T_0}$, longitud de dispersión L_D . En base a todos estos parámetros, analizados anteriormente, se puede determinar el impacto que tendrán los efectos no lineales. En el caso de encontrarnos con efectos no lineales significativos y dependiendo de los parámetros de transmisión se puede adoptar uno de los mecanismos remediales provistos en el capítulo 3.
- La relación $\frac{T_L}{T_0}$, como se ha visto, es uno de los mejores indicativos de cómo el pulso va a evolucionar temporalmente a través de la fibra. Y este mismo parámetro ayuda a determinar cómo implementar el mecanismo remedial correspondiente, debido a que esta curva indica cómo y cuándo se comprime el pulso.
- El parámetro $\varphi_{\text{máx}}$ es muy importante cuando estamos trabajando con una potencia de transmisión superior a los 10mW, puesto que con un valor $\varphi_{\text{máx}}$ superior a la unidad el espectro de la señal se verá afectado, por ende la forma del pulso será modificada.
- Existe un rango de potencia máximo con el que es posible mitigar los efectos de SPM y XPM, el mismo que está limitado por la curva $\frac{T_L}{T_0}$ y por el valor de

$\varphi_{\text{máx}}$, parámetros que están directamente relacionados con la potencia de transmisión inicial.

- Las fibras ópticas analizadas en este documento tienen varias características que difieren en cada categoría de fibra, siendo el parámetro de dispersión el más importante e influyente en los efectos de SPM y XPM.
- El programa implementado en este documento ha sido elaborado de tal manera que considera todos los parámetros importantes para proporcionar una precisión adecuada. Además este programa ayuda a calcular los valores de $\varphi_{\text{máx}}$, longitud no lineal y longitud de dispersión en cada caso.
- Las fibras con menor coeficiente de dispersión presentan efectos muy reducidos de SPM para sistemas donde solo se utiliza un canal, sin embargo en sistemas WDM es necesario tomar en cuenta la separación entre canales debido a que el ensanchamiento espectral ocasiona problemas de interferencia entre canales, y en sistemas con una separación de canales muy reducida los efectos de XPM comienzan a ser importantes.
- Existe una estrecha relación entre los fenómenos de SPM y XPM, ambos efectos están relacionados con el parámetro de dispersión de cada fibra, así mientras mayor es el valor de dispersión mayor será el impacto de SPM y XPM. Ambos efectos actúan conjuntamente, siendo así que el impacto de XPM es aumentar el efecto de SPM, por tanto en un sistema en el que no existe SPM tampoco existirá XPM.
- En este documento se han analizado varios tipos de fibra, aquellas fibras con mayor área efectiva presentan una reducción de los efectos no lineales, por otra parte las fibras con menor área efectiva presentan un impacto mayor de los efectos no lineales.

- En las simulaciones realizadas se ha observado que entre mayor sea la velocidad de transmisión el efecto de SPM y GVD se ve agravado, para dos sistemas con los mismos parámetros de transmisión y diferentes velocidades de transmisión, la distorsión de la señal en magnitud es la misma, la diferencia radica en la distancia en la que ocurren estas distorsiones, siendo la señal de mayor velocidad de transmisión distorsionada a una distancia menor en comparación con la señal que tiene una velocidad de transmisión menor.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir con el estudio de estos efectos no lineales en sistemas WDM que se utilizan modulación tanto óptica como eléctrica, puesto que en estos sistemas la separación entre canales es menor a las estudiadas en este documento, esto implica que XPM se tornará aún más significativo en altas tasas de transmisión y largas distancia.
- Se debe tomar como mecanismo remedial el cambiar la fibra como último recurso, esto dependerá del tipo de fibra utilizado, como se ha visto en la investigación de campo realizada a los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones de Quito, se está utilizando la fibra G.652 en muchos enlaces y si se desea obtener velocidades de transmisión por canal superiores a los 20Gbps la dispersión en este tipo de fibra limitará la distancia de transmisión máxima y será necesario aplicar medidas remediales drásticas como la utilización de fibra DCF en intervalos de distancia muy pequeños, y en esas condiciones será necesario el análisis para el reemplazo de la fibra.
- En los sistemas WDM es necesario considerar la distancia entre canales; en el caso de ser muy pequeña dicha distancia, se debe tomar en consideración la velocidad máxima de transmisión y el ensanchamiento que sufrirá la señal por

efectos de SPM y XPM, puesto que los espectros entre las señales aledañas se pueden interferir entre sí.

- Para sistemas en los que se presentan efectos no lineales no muy significativos, se puede optar por el aumento de potencia, siempre y cuando la fibra tenga una dispersión cromática positiva, de esta manera se pueden mitigar el impacto de los fenómenos no lineales de una forma relativamente rápida, y sin necesidad de realizar cortes de fibra para colocar la fibra DCF.
- Se recomienda realizar un estudio sobre el impacto de los fenómenos no lineales en sistemas que utilizan modulación coherente para futuros sistemas donde la velocidad de transmisión supere los 100Gbps.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, Galen H. Sasaki. Optical Networks a practical perspective. Third edition, ELSEVIER, 2010.

[2] Aldo Martin (2016, octubre). Conocimientos previos: Teoría de la luz y transmisión de datos por fibras ópticas. [Online]. Disponible en:

<http://perso.wanadoo.es/aldomartin1/caracteristicas.htm>

[3] Lorena Elizabeth Balseca Paredes (2016, octubre). “Red Óptica Interurbana para el mejoramiento de los Servicios de Telecomunicaciones entre las ciudades Ambato y Pelileo de la provincia de Tungurahua”. [Online]. Disponible en:

<http://docplayer.es/10979083-Universidad-tecnica-de-ambato-facultad-de-ingenieria-en-sistemas-electronica-e-industrial-carrera-de-ingenieria-electronica-y-comunicaciones.html>

[4] D. Gloge (2016, noviembre). Weakly Guiding Fibers. [Online]. Disponible en:

<https://www.osapublishing.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-10-10-2252&id=73014>

[5] CmpTools (2016, noviembre). La dispersión en la fibra óptica [Online]. Disponible en:

<http://grupoorion.unex.es:8001/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1HWBMTTJJ-X5QBKJ-1ZQW&partName=actualhtmltext>

[6] Gissell Maria Caraba (2016, Octubre). Fibra óptica multimodo [Online]. Disponible en:

<http://electronicaradical.blogspot.com/2011/03/fibra-optica-multimodo.html>

[7] M. en C. Ricardo Oscar Magos Pérez, Aplicación de métodos asintóticos para el cálculo de una onda electromagnética propagándose a través de una guía de onda dieléctrica casi-estratificada, Instituto Politécnico Nacional, México D.F.

[8] Erandio Bizkaia (2016, Mayo). Fundamentos de las Fibras Ópticas [Online]. Disponible en:

<http://fibraoptica.blog.tartanga.net/fundamentos-de-las-fibras-opticas>

[9] Textos científicos.com (2016, Mayo), PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA [Online]. Disponible en:

<http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades-tranmision>

[10] E. Fred Schubert (2016, mayo). Optical communication [Online]. Disponible en:

<https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap22/chap22.htm>

[11] Ing. Carrera Salazar Carlos Andrés, 2013, Proyecto de Titulación-EPN, Estudio y simulación del efecto no lineal auto modulación de fase.

[12] Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition, ELSIEVER, 2007.

[13] Optiwave (2016, mayo). SPM-Induced Spectral Broadening [Online]. Disponible en:

<http://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-system-SPM-induced-spectral-broadening/>

[14] Stamatios V. Kartalopoulos (2016, mayo). Chromatic Dispersion [Online]. Disponible en:

<http://www.globalspec.com/reference/21710/160210/chapter-2-13-2-chromatic-dispersion>

[15] ITU-T G653 (07/2010), Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fiber and cable.

[16] ITU-T G655 (11/2009), Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fiber and cable.

[17] Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios, María Carmen España Boquera, 2005

[18] RP Photonics (2016, mayo). Temporal Walk-off [Online]. Disponible en:

https://www.rp-photonics.com/temporal_walk_off.html

[19] Fideromeo Savaedra G, Álvaro Lamas N., Marco Fernández B., Yonatan Cepeda P. Efectos de la modulación de fase cruzada sobre la propagación de ondas en fibra óptica. 10 de agosto de 2005.

[20] Grupo Comunicaciones Ópticas (2016, mayo). Dispersión en la fibra [Online]. Disponible en:

http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_5_1.htm

[21] Grupo Comunicaciones Ópticas (2016, mayo). No linealidades de la fibra [Online]. Disponible en:

http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/applet/applet_tema1_6_3_2/tema1_6_3_aplicacion2.htm.

[22] RP Photonics (2016, mayo). Chromatic Dispersion [Online]. Disponible en:

https://www.rp-photonics.com/chromatic_dispersion.html.

[23] ITU-T G.650.2 (08/2015) Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fiber and cable.

[24] <http://elcajondelelectronico.com/tag/microcurvaturas>.

[25] An Overview of Macrobending and Microbending of optical Fibers, Jhon A. Jay, December 2010.

[26] RP Photonics (2016, mayo). Propagation Constant [Online]. Disponible en:

https://www.rp-photonics.com/propagation_constant.html.

[27] Facultad de Ingeniería, Universidad de la república- Uruguay (2016, Abril). Fibras Ópticas [Online]. Disponible en:

http://www.fing.edu.uy/if/cursos/optica/apuntes_files/Fibra_Optica_1.pdf

[28] ITU-T G.652 (09/11) Characteristics of a single-mode optical fiber and cable.

[29] ITU-T G.654 (10/12) Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fiber and cable.

[30] ITU-T G.656 (07/10) Characteristics of a fiber and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport.

[31] Comunicaciones Ópticas.- Msc. María Soledad Jiménez.

[32] Wayne Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Cuarta edición, Prentice-Hall.Inc, 2003.

[33] IEEE, Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications, Kazuro Kikuchi, Fellow, IEEE, Fellow, OSA 2016

ANEXOS

Anexo A: Tablas con resultados numéricos de simulación

En este anexo se presentan todos los resultados numéricos para las diversas simulaciones realizadas, los parámetros para cada caso se han obtenido tras haber realizado varias simulaciones y se presentan únicamente los resultados numéricos en donde los efectos no lineales empezaron a manifestarse.

Tabla A.1 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.653.A

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1525	10	1	100	1	0.01
		20	100	0.978	0.212
		40	100	0.955	0.423
		60	100	0.933	0.635
		100	100	0.889	1.057
	20	1	100	1	0.01
		10	100	0.974	0.106
		20	100	0.930	0.212
		40	100	0.849	0.423
		60	100	0.775	0.635
		100	100	0.665	1.057
	40	1	40	1.041	0.01
		5	45	1.025	0.05
		10	50	0.994	0.104
		20	100	1.04	0.2115
		40	100	0.99	0.42
		60	90	1.01	0.63
		100	65	1.03	1.05
	60	1	18	1.04	0.008
		5	18	1.02	0.04
		10	22	1	0.09
		20	40	1.01	0.2031
		40	46	1.015	0.412
		60	42	1.05	0.61
		100	31	1.04	0.97
	80	1	10	1.04	0.006
		5	10	1.03	0.03
		10	11	1.012	0.06
		20	22	1.02	0.17
		40	26	1.01	0.37
100		19	1.01	0.82	
100	1	6	1.04	0.004	
	5	6	1.03	0.02	
	10	6	1.02	0.04	
	20	8	1	0.1	
	40	17	1.02	0.31	
	60	17	1.06	0.47	
	100	14	1.06	0.71	

Tabla A. 2 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.653.A

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_I/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1575	10	1	100	1	0.01
		5	100	1	0.051
		10	100	0.976	0.102
		20	100	0.937	0.205
		40	100	0.861	0.41
		60	100	0.793	0.614
	100	100	0.683	1.02	
	20	1	45	1.04	0.01
		5	50	1.027	0.05
		10	65	1.01	0.104
		20	100	1.01	0.21
		40	110	1.01	0.42
		60	95	1.01	0.63
	100	70	1.04	1.05	
	40	1	10	1.039	0.0057
		5	11	1.03	0.03
		10	12	1.014	0.064
		20	25	1.04	0.17
		40	28	1.01	0.36
		60	26	1.02	0.53
	100	21	1.05	0.83	
	60	1	4	1.033	0.0028
		5	4	1.027	0.014
		10	5	1.03	0.034
		20	8	1.03	0.09
		40	12	1.02	0.25
		60	13	1.05	0.39
	100	11	1.022	0.602	
	80	1	2	1.027	0.002
		5	2	1.024	0.008
10		2	1.02	0.015	
20		2	1.01	0.03	
40		5	1.01	0.13	
60		7	1.03	0.26	
100	7	1.03	0.44		
100	1	1	1.017	7.9301e-04	
	5	1	1.015	0.004	
	10	1	1.014	0.008	
	20	1	1.04	0.01	
	40	1	1.004	0.034	
	60	3	1.01	0.13	
100	4	0.97	0.28		

Tabla A. 3 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1530	10	1	700	1.05	0.005
		5	800	1.05	0.026
		10	1000	1.01	0.1
		20	1200	1.05	0.20
		40	1500	1.02	0.21
		60	1700	1.03	0.31
		100	1600	1.04	0.52
	20	1	180	1.05	0.005
		5	200	1.058	0.026
		10	200	1.03	0.053
		20	300	1.05	0.1
		40	400	1.04	0.21
		60	440	1.05	0.31
		100	400	1.04	0.52
	40	1	39	1.043	0.005
		5	41	1.034	0.025
		10	44	1.022	0.051
		20	60	1.01	0.1
		40	100	1.04	0.21
		60	110	1.05	0.31
		100	100	1.049	0.52
	60	1	17	1.043	0.004
		5	18	1.037	0.02
		10	19	1.027	0.041
		20	24	1.01	0.09
		40	40	1.01	0.2
		60	47	1.03	0.3
		100	45	1.05	0.5
	80	1	10	1.047	0.003
		5	10	1.039	0.015
		10	11	1.037	0.031
		20	12	1.01	0.06
		40	21	1.017	0.17
		60	25	1.011	0.27
		100	26	1.04	0.46
	100	1	6	1.042	0.002
		5	6	1.037	0.01
		10	6	1.03	0.02
		20	6	1.01	0.04
		40	11	0.01	0.12
		60	15	1.01	0.22
		100	17	1.03	0.39

Tabla A. 4 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_I/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1530	10	1	700	1.06	0.005
		5	650	1.06	0.026
		10	550	1.06	0.053
		20	420	1.06	0.105
		40	350	1.05	0.1
		60	180	1.06	0.31
		100	100	1.06	0.52
	20	1	180	1.06	0.005
		5	150	1.06	0.026
		10	100	1.04	0.053
		20	50	1.02	0.1
		40	25	1.02	0.18
		60	12	1.02	0.19
		100	8	1.01	0.25
	40	1	39	1.05	0.005
		5	37	1.05	0.025
		10	33	1.05	0.05
		20	25	1.05	0.09
		40	15	1.04	0.14
		60	7	1.02	0.13
		100	4	1.02	0.14
	60	1	17	1.047	0.004
		5	15	1.05	0.02
		10	10	1.04	0.034
		20	8	1.026	0.05
		40	5	1.02	0.069
		60	5	1.024	0.1
		100	4	1.025	0.14
	80	1	10	1.05	0.003
		5	9	1.04	0.013
		10	8	1.046	0.025
		20	7	1.046	0.045
		40	6	1.051	0.08
		60	5	1.049	0.1
		100	4	1.049	0.14
	100	1	6	1.05	0.01
		5	6	1.049	0.01
		10	5	1.039	0.017
		20	5	1.49	0.035
		40	4	1.04	0.05
		60	3	1.03	0.06
		100	3	1.048	0.11

Tabla A. 5 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1550	10	1	150	1.06	0.005
		5	160	1.06	0.026
		10	180	1.05	0.052
		20	220	1.038	0.105
		40	300	1.032	0.21
		60	320	1.01	0.31
		100	310	1.04	0.52
	20	1	32	1.049	0.005
		10	35	1.026	0.049
		20	55	1.04	0.1
		40	75	1.03	0.21
		60	85	1.05	0.31
		100	77	1.04	0.52
	40	1	8	1.05	0.0025
		5	8	1.043	0.012
		10	8	1.035	0.025
		20	9	1.023	0.05
		40	17	1.04	0.15
		60	20	1.03	0.25
		100	20	1.017	0.41
	60	1	3	1.0367	0.001
		5	3	1.034	0.0056
		10	3	1.03	0.011
		20	4	1.04	0.02
		40	5	1.038	0.069
		60	7	1.04	0.13
		100	9	1.035	0.26
	80	1	1	1.013	4.0290e-04
		5	1	1.0125	0.002
		10	1	1.012	0.004
		20	2	1.04	0.01
		40	2	1.03	0.03
		60	3	1.05	0.06
		100	4	1.03	0.14
	100	1	1	1.03	4.0290e-04
		5	1	1.03	0.002
		10	1	1.03	0.004
		20	1	1.02	0.008
		40	1	1.023	0.01
		60	2	1.07	0.04
		100	2	1.04	0.07

Tabla A. 6 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_I/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1550	10	1	150	1.07	0.005
		10	100	1.061	0.052
		20	70	1.056	0.1
		40	45	1.058	0.2
		60	30	1.05	0.28
		100	20	1.04	0.41
	20	1	32	1.055	0.005
		5	30	1.06	0.024
		10	28	1.069	0.047
		20	18	1.049	0.07
		40	14	1.05	0.14
		60	11	1.05	0.18
		100	8	1.048	0.24
	40	1	8	1.053	0.0025
		5	8	1.06	0.0124
		10	7	1.05	0.022
		20	6	1.05	0.039
		40	5	1.051	0.07
		60	4	1.04	0.08
		100	3	1.037	0.11
	60	1	3	1.04	0.001
		5	3	1.04	0.0056
		10	3	1.044	0.011
		20	3	1.05	0.022
		40	2	1.03	0.03
		60	2	1.035	0.046
		100	2	1.048	0.07
	80	1	1	1.013	4.0290e-04
		5	1	1.014	0.002
		10	1	1.015	0.004
		20	1	1.016	0.008
		40	1	1.02	0.016
		60	1	1.022	0.024
		100	1	1.027	0.04
	100	1	1	1.032	4.0290e-04
5		1	1.033	0.002	
10		1	1.034	0.004	
20		1	1.036	0.006	
40		1	1.04	0.01	
60		1	1.045	0.04	
100		1	1.05	0.06	

Tabla A. 7 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_I/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1565	10	1	60	1.046	0.005
		10	80	1.042	0.052
		20	100	1.03	0.1
		40	145	1.038	0.2
		60	160	1.038	0.3
		100	150	1.04	0.51
	20	1	15	1.04	0.0036
		5	17	1.04	0.019
		10	20	1.05	0.04
		20	25	1.043	0.19
		40	35	1.034	0.29
		60	40	1.04	0.29
		100	38	1.40	0.49
	40	1	4	1.05	0.001
		5	4	1.05	0.007
		10	4	1.04	0.0142
		20	5	1.05	0.03
		40	5	1.04	0.08
		60	7	1.024	0.13
		100	10	1.044	0.28
	60	1	1	1.018	0.0004
		5	1	1.017	0.002
		10	1	1.016	0.004
		20	2	1.05	0.015
		40	2	1.04	0.03
		60	2	1.03	0.46
		100	3	1.038	0.11
	80	1	1	1.05	0.0004
		5	1	1.05	0.002
		10	1	1.05	0.004
		20	1	1.05	0.008
		40	1	1.04	0.015
		60	1	1.03	0.02
		100	1	1.028	0.04
	100	1	1	1.13	0.0004
		5	1	1.01	0.002
10		1	1.12	0.004	
20		1	1.12	0.007	
40		1	1.11	0.016	
60		1	1.10	0.024	
100		1	1.09	0.04	

Tabla A. 8 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.C (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1565	10	1	60	1.05	0.005
		10	53	1.06	0.05
		20	40	1.06	0.09
		40	30	1.06	0.09
		60	20	1.06	0.24
		100	12	1.04	0.31
	20	1	15	1.05	0.0036
		5	15	1.06	0.018
		10	14	1.06	0.034
		20	12	1.06	0.06
		40	9	1.06	0.01
		60	6	1.04	0.11
		100	4	1.04	0.14
	40	1	4	1.05	0.0014
		5	3	1.035	0.055
		10	3	1.03	0.01
		20	3	1.04	0.022
		40	3	1.05	0.04
		60	2	1.031	0.046
		100	2	1.04	0.07
	60	1	1	1.018	0.0004
		5	1	1.019	0.002
		10	1	1.019	0.004
		20	1	1.021	0.008
		40	1	1.028	0.016
		60	1	1.28	0.02
		100	1	1.34	0.04
	80	1	1	1.05	0.0004
		5	1	1.05	0.002
		10	1	1.06	0.04
		20	1	1.06	0.008
		40	1	1.07	0.016
		60	1	1.07	0.024
		100	1	1.08	0.04
	100	1	1	1.13	0.0004
		5	1	1.13	0.002
10		1	1.13	0.004	
20		1	1.14	0.008	
40		1	1.14	0.016	
60		1	1.15	0.023	
100		1	1.17	0.04	

Tabla A. 9 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1530	10	1	180	1.04	0.005
		10	240	1.04	0.053
		20	300	1.03	0.103
		40	440	1.05	0.2
		60	470	1.05	0.3
		100	420	1.01	0.51
	20	1	53	1.03	0.005
		5	55	1.022	0.026
		10	56	1	0.052
		20	75	1.03	0.01
		40	110	1.06	0.20
		60	115	1.036	0.3
		100	110	1.06	0.51
	40	1	13	1.031	0.003
		5	13	1.024	0.017
		10	14	1.017	0.036
		20	15	1.03	0.07
		40	25	1.04	0.17
		60	28	1.03	0.27
		100	28	1.04	0.28
	60	1	5	1.024	0.002
		5	5	1.02	0.009
		10	6	1.024	0.0202
		20	6	1.04	0.039
		40	7	1.02	0.088
		60	11	1.03	0.18
		100	13	1.05	0.33
	80	1	3	1.058	0.001
		5	3	1.056	0.006
		10	3	1.0522	0.011
20		3	1.043	0.02	
40		3	1.02	0.04	
60		4	1.02	0.086	
100		7	1.05	0.22	
100	1	1	1	4.0817e-04	
	5	1	1	0.002	
	10	1	1	0.004	
	20	1	1.01	0.008	
	40	1	1.01	0.01	
	60	1	1.07	0.024	
	100	2	1.006	0.07	

Tabla A. 10 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1530	10	1	180	1.05	0.005
		10	120	1.049	0.053
		20	80	1.045	0.103
		40	50	1.04	0.2
		60	30	1.03	0.3
		100	15	1.023	0.51
	20	1	53	1.058	0.005
		5	49	1.043	0.026
		10	40	1.05	0.052
		20	30	0.09	0.01
		40	20	1.05	0.16
		60	15	1.048	0.22
		100	10	1.04	0.3
	40	1	13	1.05	0.003
		5	13	1.058	0.017
		10	11	1.051	0.031
		20	8	1.04	0.05
		40	6	1.035	0.08
		60	5	1.034	0.0.10
		100	5	1.053	0.17
	60	1	4	1.01.	0.002
		5	3	1.014	0.005
		10	3	1.014	0.01
		20	3	1.02	0.039
		40	3	1.029	0.03
		60	2	1.01	0.047
		100	2	1.02	0.07
	80	1	3	1.04	0.001
		5	3	1.043	0.006
		10	3	1.047	0.011
20		2	1.024	0.02	
40		2	1.031	0.031	
60		2	1.037	0.047	
100		2	1.05	0.07	
100	1	1	1	4.0817e-04	
	5	1	1	0.002	
	10	1	1.012	0.004	
	20	1	1.013	0.008	
	40	1	1.016	0.01	
	60	1	1.02	0.024	
	100	1	1.024	0.04	

Tabla A. 11 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_I/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1550	10	1	150	1.06	0.005
		10	180	1.05	0.052
		20	220	1.038	0.105
		40	300	1.032	0.21
		60	320	1.01	0.31
		100	310	1.04	0.52
	20	1	32	1.049	0.005
		5	34	1.041	0.024
		10	35	1.026	0.049
		20	55	1.04	0.1
		40	75	1.03	0.21
		60	85	1.05	0.31
		100	77	1.04	0.52
	40	1	8	1.05	0.0025
		5	8	1.043	0.012
		10	8	1.035	0.025
		20	9	1.023	0.05
		40	17	1.04	0.15
		60	20	1.03	0.25
		100	20	1.017	0.41
	60	1	3	1.0367	0.001
		5	3	1.034	0.0056
		10	3	1.03	0.011
		20	4	1.04	0.02
		40	5	1.038	0.069
		60	7	1.04	0.13
		100	9	1.035	0.26
	80	1	1	1.013	4.0290e-04
		5	1	1.0125	0.002
		10	1	1.012	0.004
20		2	1.04	0.01	
40		2	1.03	0.03	
60		3	1.05	0.06	
100		4	1.03	0.14	
100	1	1	1.03	4.0290e-04	
	5	1	1.03	0.002	
	10	1	1.03	0.004	
	20	1	1.02	0.008	
	40	1	1.023	0.01	
	60	2	1.07	0.04	
	100	2	1.04	0.07	

Tabla A. 12 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1550	10	1	150	1.07	0.005
		10	100	1.061	0.052
		20	70	1.056	0.1
		40	45	1.058	0.2
		60	30	1.05	0.28
		100	20	1.04	0.41
	20	1	32	1.055	0.005
		5	30	1.06	0.024
		10	28	1.069	0.047
		20	18	1.049	0.07
		40	14	1.05	0.14
		60	11	1.05	0.18
		100	8	1.048	0.24
	40	1	8	1.053	0.0025
		5	8	1.06	0.0124
		10	7	1.05	0.022
		20	6	1.05	0.039
		40	5	1.051	0.07
		60	4	1.04	0.08
		100	3	1.037	0.11
	60	1	3	1.04	0.001
		5	3	1.04	0.0056
		10	3	1.044	0.011
		20	3	1.05	0.022
		40	2	1.03	0.03
		60	2	1.035	0.046
		100	2	1.048	0.07
	80	1	1	1.013	4.0290e-04
		5	1	1.014	0.002
		10	1	1.015	0.004
		20	1	1.016	0.008
		40	1	1.02	0.016
		60	1	1.022	0.024
		100	1	1.027	0.04
	100	1	1	1.032	4.0290e-04
5		1	1.033	0.002	
10		1	1.034	0.004	
20		1	1.036	0.006	
40		1	1.04	0.01	
60		1	1.045	0.04	
100		1	1.05	0.06	

Tabla A. 11 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1565	10	1	86	1.044	0.005
		10	95	1.021	0.0515
		20	130	1.012	0.1
		40	200	1.01	0.2
		60	230	1.029	0.3
		100	220	1.04	0.5
	20	1	21	1.043	0.004
		5	22	1.0356	0.021
		10	23	1	0.0869
		20	35	1.02	0.096
		40	54	1.05	0.2
		60	58	1.035	0.3
		100	54	1.027	0.5
	40	1	5	1.04	0.0017
		5	5	1.036	0.0085
		10	5	1.031	0.017
		20	6	1.03	0.39
		40	10	1.038	0.11
		60	13	1.03	0.2
		100	15	1.05	0.36
	60	1	2	1.033	7.6718e-04
		5	2	1.0317	0.0038
		10	2	1.0295	0.0077
		20	2	1.025	0.01
		40	3	1.033	0.04
		60	4	1.044	0.085
		100	5	1.01	0.17
	80	1	1	1.0266	3.9904e-04
		5	1	1.0258	0.002
		10	1	1.0248	0.004
		20	1	1.022	0.008
		40	1	1.018	0.016
		60	2	1.06	0.046
		100	2	1.033	0.07
	100	1	1	1.0639	3.9904e-04
5		1	1.0627	0.002	
10		1	1.061	0.004	
20		1	1.05	0.008	
40		1	1.052	0.01	
60		1	1.046	0.02	
100		1	1.034	0.039	

Tabla A. 14 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.D (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1565	10	1	86	1.051	0.005
		10	78	1.071	0.0515
		20	50	1.057	0.1
		40	30	1.05	0.2
		60	15	1.027	0.2
		100	12	1.03	0.31
	20	1	21	1.048	0.004
		5	20	1.054	0.021
		10	20	1.067	0.0869
		20	15	1.05	0.072
		40	10	1.047	0.11
		60	6	1.02	0.12
		100	4	1.02	0.14
	40	1	5	1.0426	0.0017
		5	5	1.0469	0.0085
		10	5	1.052	0.017
		20	5	1.06	0.039
		40	4	1.06	0.05
		60	3	1.04	0.06
		100	3	01.05	0.11
	60	1	2	1.034	7.6718e-04
		5	2	1.036	0.0038
		10	2	1.038	0.0077
		20	1	1.01	0.01
		40	1	1.013	0.016
		60	1	1.015	0.023
		100	1	1.02	0.039
	80	1	1	1.027	3.9904e-04
		5	1	1.0278	0.002
		10	1	1.0288	0.004
		20	1	1.034	0.016
		40	1	1.03	0.023
		60	1	1.039	0.023
		100	1	1.047	0.04
	100	1	1	1.0645	3.9904e-04
		5	1	1.0657	0.002
10		1	1.067	0.004	
20		1	1.07	0.008	
40		1	1.047	0.016	
60		1	1.08	0.023	
100		1	1.09	0.039	

Tabla A. 15 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1530	10	1	80	1.04	0.005
		10	87	1.02	0.05
		20	140	1.037	0.1
		40	200	1.04	0.21
		60	210	1.026	0.31
		100	200	1.05	0.52
	20	1	19	1.04	0.004
		5	20	1.035	0.02
		10	21	1.024	0.04
		20	30	1.017	0.96
		40	45	1.011	0.2
		60	55	1.05	0.31
		100	50	1.044	0.51
	40	1	4	1.31	0.0015
		5	4	1.027	0.007
		10	5	1.37	0.017
		20	6	1.038	0.04
		40	8	1.02	0.1
		60	10	1.002	0.17
		100	13	1.01	0.34
	60	1	2	1.039	0.0007
		5	2	1.37	0.0039
		10	2	1.035	0.0078
		20	2	1.030	0.015
		40	3	1.04	0.045
		60	3	1.03	0.06
		100	4	1.005	0.14
	80	1	1	1.03	0.0004
		5	1	1.03	0.002
		10	1	1.02	0.004
		20	1	1.02	0.008
		40	1	1.02	0.016
		60	1	1.01	0.02
		100	1	1.001	0.04
	100	1	1	1.07	0.0004
		5	1	1.07	0.002
		10	1	1.07	0.004
		20	1	1.06	0.008
		40	1	1.06	0.01
		60	1	1.05	0.02
		100	1	1.04	0.04

Tabla A. 16 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1530	10	1	80	1.05	0.005
		10	71	1.07	0.05
		20	50	1.06	0.1
		40	25	1.04	0.18
		60	18	1.04	0.24
		100	13	1.04	0.34
	20	1	19	1.04	0.0041
		5	19	1.05	0.02
		10	18	1.06	0.04
		20	15	1.06	0.07
		40	10	1.05	0.11
		60	8	1.05	0.15
		100	6	1.04	0.2
	40	1	4	1.03	0.001
		5	4	1.03	0.007
		10	4	1.04	0.14
		20	3	1.02	0.22
		40	3	1.03	0.04
		60	3	1.04	0.06
		100	3	1.06	0.11
	60	1	2	1.04	0.0007
		5	2	1.04	0.0039
		10	2	1.04	0.007
		20	1	1.012	0.008
		40	1	1.015	0.016
		60	1	1.017	0.024
		100	1	1.02	0.04
	80	1	1	1.03	0.0004
		5	1	1.03	0.002
		10	1	1.03	0.004
		20	1	1.03	.0082
		40	1	1.04	0.016
		60	1	1.045	0.025
		100	1	1.05	0.04
	100	1	1	1.07	0.0004
5		1	1.07	0.002	
10		1	1.07	0.004	
20		1	1.08	0.0082	
40		1	1.08	0.016	
60		1	1.09	0.024	
100		1	1.11	0.04	

Tabla A. 17 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1550	10	1	68	1.04	0.005
		10	76	1.021	0.052
		20	110	1.02	0.010
		40	170	1.04	0.021
		60	190	1.05	0.31
		100	175	1.06	0.52
	20	1	17	1.04	0.0039
		5	18	1.039	0.02
		10	18	1.02	0.04
		20	30	1.04	0.096
		40	43	1.04.	0.2
		60	48	1.06	0.31
		100	43	1.03	0.51
	40	1	4	1.04	0.001
		5	4	1.037	0.0073
		10	4	1.03	0.014
		20	5	1.04	0.035
		40	6	1.03	0.08
		60	10	1.04	0.17
		100	12	1.06	0.32
	60	1	2	1.05	0.0007
		5	2	1.05	0.0039
		10	2	1.04	0.0078
		20	2	1.04	0.015
		40	2	1.03	0.031
		60	3	1.05	0.07
		100	4	1.04	0.14
	80	1	1	1.04	0.0004
		5	1	1.04	0.002
		10	1	1.04	0.0041
		20	1	1.03	0.0082
		40	1	1.03	0.016
		60	1	1.02	0.02
		100	1	1.017	0.04
	100	1	1	1.1	0.004
5		1	1.09	0.002	
10		1	1.09	0.004	
20		1	1.09	0.0082	
40		1	1.08	0.016	
60		1	1.078	0.024	
100		1	1.06	0.04	

Tabla A. 18 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1550	10	1	67	1.05	0.0052
		10	60	1.06	0.052
		20	40	1.06	0.1
		40	30	1.06	0.19
		60	20	1.05	0.25
		100	10	1.03	0.29
	20	1	17	1.05	0.0039
		5	17	1.06	0.019
		10	16	1.074	0.039
		20	12	1.05	0.065
		40	10	1.06	0.11
		60	7	1.04	0.13
		100	5	1.04	0.17
	40	1	4	1.04	0.001
		5	4	1.047	0.007
		10	4	1.05	0.0145
		20	4	1.06	0.029
		40	3	1.045	0.045
		60	3	1.056	0.067
		100	2	1.03	0.078
	60	1	2	1.05	0.0007
		5	2	1.05	0.0039
		10	2	1.06	0.0078
		20	1	1.02	0.0082
		40	1	1.02	0.016
		60	1	1.022	0.024
		100	1	1.03	0.04
	80	1	1	1.042	0.0004
		5	1	1.04	0.002
		10	1	1.04	0.0041
		20	1	1.047	0.0082
		40	1	1.052	0.016
		60	1	1.05	0.024
		100	1	1.068	0.041
	100	1	1	1.1	0.0004
5		1	1.1	0.002	
10		1	1.1	0.0042	
20		1	1.11	0.0082	
40		1	1.11	0.016	
60		1	1.12	0.024	
100		1	1.13	0.041	

Tabla A. 19 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1565	10	1	60	1.046	0.005
		10	80	1.042	0.052
		20	100	1.03	0.1
		40	145	1.038	0.2
		60	160	1.038	0.3
		100	150	1.04	0.51
	20	1	15	1.04	0.0036
		5	17	1.04	0.019
		10	20	1.05	0.04
		20	25	1.043	0.19
		40	35	1.034	0.29
		60	40	1.04	0.29
		100	38	1.40	0.49
	40	1	4	1.05	0.001
		5	4	1.05	0.007
		10	4	1.04	0.0142
		20	5	1.05	0.03
		40	5	1.04	0.08
		60	7	1.024	0.13
		100	10	1.044	0.28
	60	1	1	1.018	0.0004
		5	1	1.017	0.002
		10	1	1.016	0.004
		20	2	1.05	0.015
		40	2	1.04	0.03
		60	2	1.03	0.46
		100	3	1.038	0.11
	80	1	1	1.05	0.0004
		5	1	1.05	0.002
		10	1	1.05	0.004
		20	1	1.05	0.008
		40	1	1.04	0.015
		60	1	1.03	0.02
		100	1	1.028	0.04
	100	1	1	1.13	0.0004
		5	1	1.01	0.002
10		1	1.12	0.004	
20		1	1.12	0.007	
40		1	1.11	0.016	
60		1	1.10	0.024	
100		1	1.09	0.04	

Tabla A. 20 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (+NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_1/T_0	$\Phi_{\text{máximo}}$
1565	10	1	60	1.05	0.005
		5	57	1.06	0.02
		10	53	1.06	0.05
		20	40	1.06	0.09
		40	30	1.06	0.09
		60	20	1.06	0.24
		100	12	1.04	0.31
	20	1	15	1.05	0.0036
		5	15	1.06	0.018
		10	14	1.06	0.034
		20	12	1.06	0.06
		40	9	1.06	0.01
		60	6	1.04	0.11
		100	4	1.04	0.14
	40	1	4	1.05	0.0014
		5	3	1.035	0.055
		10	3	1.03	0.01
		20	3	1.04	0.022
		40	3	1.05	0.04
		60	2	1.031	0.046
		100	2	1.04	0.07
	60	1	1	1.018	0.0004
		5	1	1.019	0.002
		10	1	1.019	0.004
		20	1	1.021	0.008
		40	1	1.028	0.016
		60	1	1.28	0.02
		100	1	1.34	0.04
	80	1	1	1.05	0.0004
		5	1	1.05	0.002
		10	1	1.06	0.04
		20	1	1.06	0.008
		40	1	1.07	0.016
		60	1	1.07	0.024
		100	1	1.08	0.04
	100	1	1	1.13	0.0004
		5	1	1.13	0.002
		10	1	1.13	0.004
		20	1	1.14	0.008
		40	1	1.14	0.016
		60	1	1.15	0.023
		100	1	1.17	0.04

Tabla A. 21 Resultados numéricos de simulaciones para la fibra G.655.E (-NZ-DSF)

Longitud de onda (nm)	Vt(Gbps)	Potencia (mW)	Distancia (km)	T_L/T_0	$\varphi_{\text{máximo}}$
1565	10	1	60	1.05	0.005
		5	57	1.06	0.02
		10	53	1.06	0.05
		20	40	1.06	0.09
		40	30	1.06	0.09
		60	20	1.06	0.24
		100	12	1.04	0.31
	20	1	15	1.05	0.0036
		5	15	1.06	0.018
		10	14	1.06	0.034
		20	12	1.06	0.06
		40	9	1.06	0.01
		60	6	1.04	0.11
		100	4	1.04	0.14
	40	1	4	1.05	0.0014
		5	3	1.035	0.055
		10	3	1.03	0.01
		20	3	1.04	0.022
		40	3	1.05	0.04
		60	2	1.031	0.046
		100	2	1.04	0.07
	60	1	1	1.018	0.0004
		5	1	1.019	0.002
		10	1	1.019	0.004
		20	1	1.021	0.008
		40	1	1.028	0.016
		60	1	1.28	0.02
		100	1	1.34	0.04
	80	1	1	1.05	0.0004
		5	1	1.05	0.002
		10	1	1.06	0.04
		20	1	1.06	0.008
		40	1	1.07	0.016
		60	1	1.07	0.024
		100	1	1.08	0.04
	100	1	1	1.13	0.0004
		5	1	1.13	0.002
		10	1	1.13	0.004
		20	1	1.14	0.008
		40	1	1.14	0.016
		60	1	1.15	0.023
		100	1	1.17	0.04

Anexo B: Encuestas realizadas a los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones locales

En este anexo se presentan las preguntas formuladas a los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones en la ciudad de Quito, con sus respectivas respuestas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Proveedor 1

1) Número de canales (lambdas) que utilizan es sus sistemas WDM

Entre 40 y 80 lambdas, en la red OTN se utilizan 80 lambdas.

2) Tipo de fibra que utilizan (G652, G653, etc.)

Se utiliza la fibra G.652.D en enlaces metropolitanos y la G.655.C en backbone y enlaces de grandes distancias.

3) Distancia en la que ubican amplificadores Raman/EDFA

Depende de los requerimientos del sistema en promedio los ubican en enlaces que superan los 180km.

4) Banda de operación (C, L, S)

Utilizan la banda C (1550nm).

5) Velocidad de transmisión por canal

Trabajan a 10Gbps por canal en todos los sistemas, en un futuro van a implementar enlaces a 40Gbps por canal.

6) Distancia en la que ubican DCF (compensador de dispersión)

Dependiendo de los parámetros de cada sistema los ubican en promedio a 40km, 60km y 120km.

7) Distancia en la que ubican regeneradores

Mayormente no necesitan regeneradores, en el caso de utilizarlos la distancia varia acorde a los parámetros de cada sistema.

8) Separación entre canales

La separación utilizada entre canales varía entre 50GHz y 100GHz.

9) Potencia de transmisión utilizada

Depende de los requerimientos de cada sistema, no se superan los 10mW.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Proveedor 2

1) Número de canales (lambdas) que utilizan es sus sistemas WDM

Entre 40 y 80 lambdas.

2) Tipo de fibra que utilizan (G652, G653, etc.)

Se utiliza la fibra G.652.D en la mayoría de los enlaces y la G.655.C en backbone, las otras categorías de fibra no son utilizadas.

3) Distancia en la que ubican amplificadores Raman/EDFA

Depende de los requerimientos del sistema en promedio los ubican en enlaces que superan los 120km, se utiliza mayormente amplificadores Raman.

4) Banda de operación (C, L, S)

Utilizan la banda C (1550nm).

5) Velocidad de transmisión por canal

Trabajan a 10Gbps por canal en todos los sistemas.

6) Distancia en la que ubican DCF (compensador de dispersión)

Dependiendo de los parámetros de cada sistema los ubican en promedio a 40km, 60km y 120km.

7) Distancia en la que ubican regeneradores

Mayormente no necesitan regeneradores, en el caso de utilizarlos la distancia varia acorde a los parámetros de cada sistema.

8) Separación entre canales

La separación utilizada entre canales varía entre 50GHz y 100GHz.

9) Potencia de transmisión utilizada

Depende de los requerimientos de cada sistema, no se superan los 10mW.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Proveedor 4

- 1) Número de canales (lambdas) que utilizan es sus sistemas WDM**
Se utilizan sistemas de 40 lambdas.
- 2) Tipo de fibra que utilizan (G652, G653, etc.)**
Mayormente se utiliza la fibra G.652.D la fibra G.655.C en backbone.
- 3) Distancia en la que ubican amplificadores Raman/EDFA**
Depende de los requerimientos del sistema, normalmente son necesarios.
- 4) Banda de operación (C, L, S)**
Utilizan la banda C (1550nm).
- 5) Velocidad de transmisión por canal**
Trabajan a 10Gbps por canal en todos los sistemas.
- 6) Distancia en la que ubican DCF (compensador de dispersión)**
Dependiendo de los parámetros de cada sistema, normalmente no son necesarios.
- 7) Distancia en la que ubican regeneradores**
Mayormente no necesitan regeneradores.
- 8) Separación entre canales**
La separación utilizada entre canales es de 100GHz.
- 9) Potencia de transmisión utilizada**
Depende de los requerimientos de cada sistema, no se superan los 10mW.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Proveedor 3

1) Número de canales (lambdas) que utilizan es sus sistemas WDM

Entre 40 y 80 lambdas.

2) Tipo de fibra que utilizan (G652, G653, etc.)

Se utiliza la fibra G.652.D en enlaces metropolitanos y la G.655.C en backbone y en distancias grandes.

3) Distancia en la que ubican amplificadores Raman/EDFA

Depende de los requerimientos del sistema en promedio los ubican en enlaces que superan los 100km, se utiliza mayormente amplificadores Raman.

4) Banda de operación (C, L, S)

Utilizan la banda C (1550nm).

5) Velocidad de transmisión por canal

Trabajan a 10Gbps y 40Gbps por canal, la fibra utilizada para los enlaces de 40Gbps es la G.655C, en un futuro planean implementar sistemas que operen a 100Gbps por canal.

6) Distancia en la que ubican DCF (compensador de dispersión)

Dependiendo de los parámetros de cada sistema, generalmente los utilizan en enlaces de grandes distancias.

7) Distancia en la que ubican regeneradores

Dependiendo de los parámetros de cada sistema, generalmente los utilizan en enlaces de grandes distancias, en promedio los ubican a 80km.

8) Separación entre canales

La separación utilizada entre canales varía entre 25GHz, 50GHz y 100GHz.

9) Potencia de transmisión utilizada

Depende de los requerimientos de cada sistema, no se superan los 10mW.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Proveedor 5

1) Número de canales (lambdas) que utilizan es sus sistemas WDM

Se utilizan sistemas de 40, 80 y 160 lambdas.

2) Tipo de fibra que utilizan (G652, G653, etc.)

Mayormente se utiliza la fibra G.653.C la fibra G.655.C en backbone.

3) Distancia en la que ubican amplificadores Raman/EDFA

Depende de los requerimientos del sistema, normalmente son necesarios.

4) Banda de operación (C, L, S)

Utilizan la banda C (1550nm).

5) Velocidad de transmisión por canal

Todos los sistemas tienen canales de 10Gbps, en los sistemas de 40 lambdas emplean canales de 40 Gbps.

6) Distancia en la que ubican DCF (compensador de dispersión)

Dependiendo de los parámetros de cada sistema, normalmente no son necesarios.

7) Distancia en la que ubican regeneradores

Mayormente no necesitan regeneradores.

8) Separación entre canales

La separación utilizada entre canales es de 100GHz, 50 y 25 Ghz.

9) Potencia de transmisión utilizada

Depende de los requerimientos de cada sistema, no se superan los 10mW.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Proveedor 6

1) Número de canales (lambdas) que utilizan es sus sistemas WDM

Se utilizan sistemas de 40, 80 y 160 lambdas.

2) Tipo de fibra que utilizan (G652, G653, etc.)

Mayormente se utiliza la fibra G.653.C la fibra G.655.C en backbone.

3) Distancia en la que ubican amplificadores Raman/EDFA

Depende de los requerimientos del sistema, normalmente son necesarios.

4) Banda de operación (C, L, S)

Utilizan la banda C (1550nm).

5) Velocidad de transmisión por canal

Todos los sistemas tienen canales de 10Gbps, en los sistemas de 40 lambdas emplean canales de 40 Gbps, también poseen dos enlaces de 100Gbps para esto se ha empleado técnicas de modulación coherente.

6) Distancia en la que ubican DCF (compensador de dispersión)

Dependiendo de los parámetros de cada sistema, normalmente no son necesarios.

7) Distancia en la que ubican regeneradores

Mayormente no necesitan regeneradores.

8) Separación entre canales

La separación utilizada entre canales es de 100GHz, 50 y 25 Ghz.

9) Potencia de transmisión utilizada

Depende de los requerimientos de cada sistema, no se superan los 10mW.

Anexo C: Normas de la ITU-T

Este anexo se presenta de manera virtual, puesto que es muy extenso, cuyo contenido consiste en las normas de la ITU-T G.650.2 y G.663, puesto que algunos datos han sido obtenidos de estas normas para las respectivas simulaciones.