# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### ESTUDIO Y SIMULACIÓN DEL EFECTO NO LINEAL AUTOMODULACIÓN DE FASE

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

**CARRERA SALAZAR CARLOS ANDRÉS**

**charles.carrera@hotmail.com**

**DIRECTORA: MSc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZJIMÉNEZ**

**maria.jimenez@epn.edu.ec**

**QUITO, DICIEMBRE 2013**

# DECLARACIÓN

Yo, Carlos Andrés Carrera Salazar, 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.

_____

Carlos Andrés Carrera Salazar

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Andrés Carrera Salazar, bajo mi supervisión.

_____

Ing. MARÍA SOLEDADJIMÉNEZ JIMÉNEZ MSc.

DIRECTORA DEL PROYECTO

# AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios quien día a día guía mis pasos pasa surgir como persona y quien me da las fuerzas para alcanzar mis metas. A mis padres Rodrigo Carrera y Sandy Salazar que siempre estuvieron a mi lado y me han apoyado a lo largo de toda mi vida. A mi abuelita Polonia quien siempre me dio los ánimos suficientes para salir adelante.

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por haberme formado con conocimientos en el campo de las telecomunicaciones, en especial a la MSc. María Soledad Jiménez quien me apoyó para la realización de este proyecto de titulación.

Carlos Andrés Carrera Salazar

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres quienes me motivaron desde un principio en mi formación universitaria.

A mi esposa Paola Mariño y a mi hijo Thiago André que han sido un gran apoyo, ya que sin ellos no hubiese logrado obtener este título.

A todos mis compañeros que estuvieron a mi lado en las buenas y en las malas. Gracias a todos.

Carlos Andrés Carrera Salazar

# CONTENIDOS

**RESUMEN** ..... XVI

**PRESENTACIÓN** ..... XIX

**CAPÍTULO 1** ..... 1

**INTRODUCCIÓN SOBRE FIBRA ÓPTICA** ..... 1

1.1 FIBRA ÓPTICA ..... 1

1.1.1 Materiales utilizados en la fabricación de fibras ópticas ..... 2

1.1.1.1 Fibras ópticas de vidrio ..... 2

1.1.1.2 Fibras ópticas de plástico ..... 3

1.1.2 Espectro Electromagnético ..... 3

1.1.3 Estructura de la Fibra Óptica ..... 4

1.1.4 Índice de Refracción ..... 5

1.1.5 Propagación de la luz sobre la fibra óptica ..... 7

1.1.5.1 Principio de refracción ..... 7

1.1.5.2 Principio de Reflexión Total ..... 8

1.1.6 Clases de Fibras Ópticas ..... 9

1.1.6.1 Fibra Óptica Multimodo ..... 9

1.1.6.1.1 Fibra óptica multimodo de índice escalonado ..... 10

1.1.6.1.2 Fibra óptica multimodo de índice gradual ..... 12

1.1.6.2 Fibra Óptica Monomodo ..... 13

1.2 EFECTOS LINEALES DE LA FIBRA ÓPTICA ..... 15

1.2.1 Atenuación en las fibras ópticas ..... 15

1.2.1.1 Atenuación por Factores Intrínsecos ..... 16

1.2.1.2 Atenuación por Factores Extrínsecos ..... 18

1.2.2 Atenuación Total .....21

1.3 DISPERSIÓN EN FIBRA ÓPTICA.....23

1.3.1 Dispersión Modal.....24

1.3.2 Dispersión Cromática .....25

1.3.2.1 Dispersión cromática de guía de onda .....26

1.3.2.2 Dispersión cromática de material .....26

1.3.3 Dispersión por modo de polarización (PMD, Polarization Mode Dispersion) .....27

1.4 TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO.....29

1.4.1 Fibra Óptica Monomodo Estándar .....29

1.4.2 Fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada.....31

1.4.2.1 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada – Recomendación G.653 .....32

1.4.2.2 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada – Recomendación G.654 .....34

1.4.3 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada no Nula.....35

1.4.3.1 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada no Nula - Recomendación G.655.....36

1.4.3.2 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada no Nula - Recomendación G.656.....40

1.5 PARÁMETROS ASOCIADOS A LOS EFECTOS NO LINEALES .....42

1.5.1 Longitud efectiva de una fibra óptica “Leff” .....42

1.5.2 Área efectiva de una fibra óptica “$A_{eff}$”.....44

1.6 EFECTOS NO LINEALES DE LA FIBRA ÓPTICA.....45

1.6.1 Efectos no Lineales debido a la Variación del Índice de Refracción .....46

1.6.1.1 Automodulación de fase (SPM, Self Phase Modulation) .....46

1.6.1.2 Modulación de fase cruzada (XPM, Cross Phase Modulation) .....48
1.6.1.3 Mezcla de cuatro ondas (FWM, Four Wavelenght Mixing).....48
1.6.2 Efectos no Lineales debido al Scattering Estimulado.....49
1.6.2.1 Scattering Estimulado de Raman (SRS, Stimulated Raman Scattering).....49
1.6.2.2 Scattering Estimulado de Brillouin (SBS, Stimulated Brillouin Scattering).....51

**CAPÍTULO 2** .....54

**ESTUDIO DE LA AUTOMODULACIÓN DE FASE**.....54

2.1 DISPERSIÓN CROMÁTICA.....55
2.2 LONGITUD DE DISPERSIÓN Y LONGITUD NO LINEAL.....60
2.3 REFRACCIÓN NO LINEAL .....62
2.4 TIPOS DE PULSOS ÓPTICOS.....64
2.4.1 Pulsos Gaussianos.....64
2.4.2 Pulsos super-gaussianos.....65
2.4.3 Pulsos Secantes.....66
2.5 ENSANCHAMIENTO DEL ESPECTRO INDUCIDO POR SPM .....67
2.6 EFECTOS DE DISPERSIÓN DE TERCER ORDEN (TOD) SOBRE SPM.....71
2.7 EJEMPLOS PRÁCTICOS .....73
2.7.1 Análisis de SPM para fibras ópticas monomodo estándar (SSMF, Standard Single Mode Fibre) .....73
2.7.1.1 Cálculo de longitudes efectivas .....75
2.7.1.2 Cálculo de las longitudes de dispersión y no lineales.....77
2.7.1.1.1 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=30Km .....80

2.7.1.1.2 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=70Km ..... 82
2.7.1.1.3 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud =200Km ..... 84
2.7.2 Análisis de SPM para fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada (DSF, Dispersion Shifted Fibre) ..... 87
2.7.2.1 Cálculo de las longitudes efectivas ..... 88
2.7.2.2 Cálculo de las longitudes de dispersión y no lineales ..... 90
2.7.2.2.1 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF de longitud L=30Km ..... 91
2.7.2.2.2 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF de longitud L=70Km ..... 92
2.7.2.2.3 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF de longitud L=200Km ..... 93
2.7.3 Análisis de SPM para fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada no nula (NZ-DSF, Non Zero Dispersion Shifted Fibre) ..... 96
2.7.3.1 Cálculo de las longitudes de dispersión y no lineales ..... 97
2.7.3.1.1 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF de longitud L=30Km ..... 98
2.7.3.1.2 Análisis de SPM en fibras monomodo NZ-DSF de longitud L=70Km ..... 99
2.7.3.1.3 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF de longitud L=200Km ..... 100

**CAPÍTULO 3** ..... 104

**SIMULACIÓN DE LA AUTOMODULACIÓN DE FASE** ..... 104

3.1 ANÁLISIS DEL SOFTWARE ..... 105
3.2 INTERFAZ GRÁFICA DEL SOFTWARE NLSE SOLVER ..... 106

3.3 TABULACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS.....110

3.4 SIMULACIÓN DE LA AUTOMODULACIÓN DE FASE .....112

3.4.1 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo estándar (SSMF).....113

3.4.1.1 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=30Km.....113

3.4.1.2 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=70Km .....121

3.4.1.3 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=200Km.....128

3.4.2 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada (DSF) .....135

3.4.2.1 Simulación de SPM en fibras DSF de longitud L=30Km .....135

3.4.2.2 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo DSF de longitud L=70Km.....141

3.4.2.3 Simulación de SPM en fibras monomodo DSF de longitud L=200Km.....148

3.4.3 Simulación de SPM en fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZ-DSF).....154

3.4.3.1 Simulación de SPM en fibras NZ-DSF de longitud L=30Km.....155

3.4.3.2 Simulación de SPM en fibras monomodo NZ-DSF de longitud L=70Km.....161

3.4.3.3 Simulación de SPM en fibras monomodo NZ-DSF de longitud L=200Km.....166

3.5 ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN DE TERCER ORDEN .....171

**CAPÍTULO 4** ..... 180

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** ..... 180

4.1 CONCLUSIONES ..... 180

4.2 RECOMENDACIONES ..... 185

**BIBLIOGRAFÍA** ..... 187

Referida de textos: ..... 187

Referida de páginas web: ..... 188

Referencia de Tesis ..... 189

**GLOSARIO** ..... 190

**ANEXOS** ..... 193

**Anexo 1**: Área efectiva del campo modal ..... 194

**Anexo 2**: Ecuación no lineal de Schrödinger ..... 196

**Anexo 3**: Tipos de fibras ópticas monomodo SSMF y NZ-DSF ..... 198

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

**FIGURA 1.1**Espectro de frecuencias .....3
**FIGURA 1.2** Elementos de una fibra óptica.....4
**FIGURA 1.3** Variación de ng respecto a λ.....6
**FIGURA 1.4** Ley de refracción .....7
**FIGURA 1.5** Principio de Reflexión Total.....8
**FIGURA 1.6** Fibra óptica multimodo de índice escalonado .....11
**FIGURA 1.7** Ensanchamiento del pulso en una fibra óptica multimodo de índice escalonado .....11
**FIGURA 1.8** Variación del índice de refracción en fibrasópticas multimodo de índice gradual .....12
**FIGURA 1.9** Ensanchamiento del pulso en una fibra óptica multimodo de índice gradual ....12
**FIGURA 1.10** Propagación del pulso óptico en una fibra óptica monomodo.....14
**FIGURA 1.11** Corte transversal de la fibra monomodo y perfil de índice de refracción.....14
**FIGURA 1.12** Factores intrínsecos y extrínsecos de la atenuación.....16
**FIGURA 1.13** Absorción debido a impurezas.....18
**FIGURA 1.14** Pérdidas por macro-curvatura de la fibra.....19
**FIGURA 1.15** Pérdidas por micro-curvatura de la fibra .....20
**FIGURA 1.16** Ventanas de transmisión de la fibra óptica .....22
**FIGURA 1.17** Dispersión Total en la fibra óptica.....24
**FIGURA 1.18** Dispersión Modal.....25
**FIGURA 1.19** Efecto de la Dispersión por Modo de Polarización .....28
**FIGURA 1.20** Dispersión en fibras ópticas monomodo estándar .....29
**FIGURA 1.21** Dispersión cromática desplazada nula a λ=1550 nm.....31
**FIGURA 1.22** Ganancia de Raman vs. Desplazamiento de Frecuencia.....50

**FIGURA 2.1** Variación del parámetro D respecto a la longitud de onda.....58
**FIGURA 2.2** Forma del pulso óptico con distintos parámetros .....60
**FIGURA 2.3** Variación del índice de refracción vs la potencia óptica .....62
**FIGURA 2.4** (a) Pulso Gaussiano, (b) Pulso Super-gaussiano .....66

**FIGURA 2.5** Forma del pulso con varios desfases .....71
**FIGURA 2.6** Espectro del pulso gaussiano para $N = 1$ .....71
**FIGURA 2.7** Esquema de ejemplos con fibras ópticas SSMF .....73
**FIGURA 2.8** Esquema de ejemplos con fibras ópticas monomodo DSF .....87
**FIGURA 2.9** Esquema de ejemplos con fibras ópticas monomodo NZ-DSF .....96

**FIGURA 3.1** Interfaz Gráfica NLSE Solver.....108
**FIGURA 3.2** Opciones del programa .....109
**FIGURA 3 3** Opción File del software.....109
**FIGURA 3.4** Opciones avanzadas.....110
**FIGURA 3.5** Información del programa .....110
**FIGURA 3.6** Forma Inicial del pulso óptico .....113
**FIGURA 3.7**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) .....114
**FIGURA 3.8**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) .....115
**FIGURA 3.9**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF(L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) .....115
**FIGURA 3.10**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps) .....116
**FIGURA 3.11**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps) .....117
**FIGURA 3.12**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km P=2mW y $T_0$=25ps) .....118
**FIGURA 3.13**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps) .....118
**FIGURA 3.14**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF(L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps) .....119
**FIGURA 3.15**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps) .....119

**FIGURA 3.16**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 120
**FIGURA 3.17**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 121
**FIGURA 3.18**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 122
**FIGURA 3.19**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 122
**FIGURA 3.20**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 123
**FIGURA 3.21**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 124
**FIGURA 3.22**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 125
**FIGURA 3.23**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 125
**FIGURA 3.24**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 126
**FIGURA 3.25**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 127
**FIGURA 3.26**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 127
**FIGURA 3.27**Introducción de datos para fibraóptica monomodo SSMF (L=200Km P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 128
**FIGURA 3.28**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 129
**FIGURA 3.29**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 129
**FIGURA 3.30**Simulación de SPMpara fibraóptica monomodo SSMF (L=200Km P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 130

**FIGURA 3.31**Simulación de SPMpara fibraóptica monomodo SSMF (L=200Km P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 131
**FIGURA 3.32**Introducción de datos para fibraóptica monomodo SSMF (L=200Km P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 132
**FIGURA 3.33**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 132
**FIGURA 3.34**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 133
**FIGURA 3.35**Simulación de SPMpara fibraóptica monomodo SSMF (L=200Km P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 134
**FIGURA 3.36**Simulación de SPMpara fibraóptica monomodo SSMF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 134
**FIGURA 3.37**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 136
**FIGURA 3.38**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 136
**FIGURA 3.39**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 137
**FIGURA 3.40**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 137
**FIGURA 3.41**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 138
**FIGURA 3.42**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 138
**FIGURA 3.43**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 139
**FIGURA 3.44**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 139
**FIGURA 3.45**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 140

**FIGURA 3.46**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 141
**FIGURA 3.47**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 142
**FIGURA 3.48**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 142
**FIGURA 3.49**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 143
**FIGURA 3.50**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 144
**FIGURA 3.51**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 144
**FIGURA 3.52**Introducción de datospara fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 145
**FIGURA 3.53**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 146
**FIGURA 3.54**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps) ..... 146
**FIGURA 3.55**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 147
**FIGURA 3.56**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km P=20mW y $T_0$=25ps) ..... 147
**FIGURA 3.57**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 148
**FIGURA 3.58**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 149
**FIGURA 3.59**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km P=2mW y $T_0$=100ps) ..... 149
**FIGURA 3.60**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps) ..... 150

**FIGURA 3.61**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps) .....151
**FIGURA 3.62**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps) .....151
**FIGURA 3.63**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km P=2mW y $T_0$=25ps) .....152
**FIGURA 3.64**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km P=2mW y $T_0$=25ps) .....152
**FIGURA 3.65**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps) .....153
**FIGURA 3.66**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps) .....154
**FIGURA 3.67**Introducción de datos para fibraóptica monomodo NZ-DSF (L=30Km P=2mW y $T_0$=100ps) .....155
**FIGURA 3.68**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) .....156
**FIGURA 3.69**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps) .....156
**FIGURA 3.70**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps) .....157
**FIGURA 3.71**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps) .....157
**FIGURA 3.72**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps) .....158
**FIGURA 3.73**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps) .....158
**FIGURA 3.74**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps) .....159
**FIGURA 3.75**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps) .....159

**FIGURA 3.76**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps).....160
**FIGURA 3.77**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps).....161
**FIGURA 3.78**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps).....161
**FIGURA 3.79**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps).....162
**FIGURA 3.80**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps).....162
**FIGURA 3.81**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps).....163
**FIGURA 3.82**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps).....163
**FIGURA 3.83**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps).....164
**FIGURA 3.84**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps).....164
**FIGURA 3.85**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps).....165
**FIGURA 3.86**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps).....165
**FIGURA 3.87**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps).....166
**FIGURA 3.88**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps).....166
**FIGURA 3.89**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps).....167
**FIGURA 3.90**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps).....167

**FIGURA 3.91**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps).....168
**FIGURA 3.92**Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps).....168
**FIGURA 3.93**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps).....169
**FIGURA 3.94**Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps).....169
**FIGURA 3.95**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps).....170
**FIGURA 3.96**Simulación de SPMpara fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps).....170
**FIGURA 3.97**Datos introducidos en el software ($\beta_3 = 4\,ps^3/Km$) .....173
**FIGURA 3.98**Respuesta de SPM para fibras ópticas monomodo cuando ($\beta_3 = 4\,ps^3/Km$) .....173
**FIGURA 3.99**Datos introducidos en el software ($\beta_3 = 2\,ps^3/Km$) .....174
**FIGURA 3.100**Respuesta de SPM para fibras ópticas monomodo cuando($\beta_3 = 2\,ps^3/Km$) .....175
**FIGURA 3.101**Datos introducidos en el software ($\beta_3 = 1\,ps^3/Km$) .....175
**FIGURA 3.102**Respuesta de SPM para fibras ópticas monomodo cuando($\beta_3 = 1\,ps^3/Km$) .....176

# ÍNDICE DE TABLAS

**TABLA 1.1** Pérdidas por efecto Rayleigh ..... 17
**TABLA 1.2** Ventanas de transmisión de la fibra óptica ..... 22
**TABLA 1.3** Valores de PMD típicos ..... 28
**TABLA 1.4** Parámetros de las fibras ópticas monomodo estándar (SSMF) ..... 30
**TABLA 1.5** Aplicaciones de las fibras ópticas monomodo estándar ..... 31
**TABLA 1.6** Parámetros de fibras ópticas DSF (Recomendación G.653A) ..... 32
**TABLA 1.7** Parámetros de fibras ópticas DSF (Recomendación G.653B) ..... 33
**TABLA 1.8** Parámetros de fibras ópticas DSF (Recomendación G.654A) ..... 34
**TABLA 1.9** Parámetros de fibras ópticas DSF (Recomendación G.654B) ..... 35
**TABLA 1.10** Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.655C) ..... 37
**TABLA 1.11** Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.655D) ..... 38
**TABLA 1.12** Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.655E) ..... 39
**TABLA 1.13** Coeficientes de dispersión cromática (Recomendación G.655) ..... 40
**TABLA 1.14** Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.656) ..... 41
**TABLA 1.15** Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.656) ..... 41
**TABLA 1.16** Valores de áreas efectivas ..... 44
**TABLA 2.1** Tabulación de longitudes efectivas para fibras ópticas SSMF ..... 77
**TABLA 2.2** Tabulación de longitudes no lineales para fibras ópticas SSMF ..... 78
**TABLA 2.3** Tabulación de longitudes de dispersión para fibras ópticas SSMF ..... 79
**TABLA 2.4** Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas SSMF con $V_t$=10Gbps ..... 85
**TABLA 2.5** Resultados teóriocs del estudio de SPM en fibras ópticas SSMF con Vt=40Gbps ..... 86
**TABLA 2.6** Resultados de $\delta\omega_{max}$ reales del estudio de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF ..... 86
**TABLA 2.7** Tabulación de longitudes efectivas en fibras ópticas DSF ..... 89
**TABLA 2.8** Tabulación de longitudes no lineales en fibras ópticas DSF ..... 90
**TABLA 2.9** Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas DSF con Vt=10Gbps 94

**TABLA 2.10**Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas DSF con Vt=40Gbps 94
**TABLA 2.11**Resultados de $\delta\omega_{max}$ reales del estudio de SPM en fibras ópticas monomodo DSF .....95
**TABLA 2.12** Tabulación de longitudes no lineales en fibras ópticas NZ-DSF .....98
**TABLA2.13**Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas NZ-DSF con Vt=10Gbps .....101
**TABLA2.14**Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas NZ-DSF con Vt=40Gbps .....102
**TABLA 2.15**Resultados de $\delta\omega_{max}$ reales del estudio de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF .....102
**TABLA 2.16** Compilación de resultados obtenidos en el estudio de SPM .....103
**TABLA 3.1** Coeficiente de atenuación de cada tipo de fibra óptica .....111
**TABLA 3.2** Coeficientes no lineales de cada fibra óptica.....111
**TABLA 3.3** Ancho inicial de los pulsos ópticos .....112

# RESUMEN

Debido a los beneficios que ofrece la transmisión por fibra óptica (largas distancias y altas velocidades de transmisión), es necesario realizar estudios minuciosos con el fin de mantener una alta calidad en la propagación de la información. Se debe analizar los efectos que se producen cuando se utilizan determinados parámetros en el diseño de una red óptica.

Los efectos que se presentan en la transmisión por fibra óptica son de carácter lineales y no lineales. En el primer capítulo el enfoque se basa sobre dichos efectos con sus principales características. Los efectos lineales a los cuales se hace referencia son: atenuación y dispersión; mientras que los efectos no lineales se clasifican en dos categorías, la primera categoría son los que se deben al efecto Kerr (Automodulación de fase, Modulación de fase cruzada y Mezcla de cuatro ondas); y, la segunda categoría los que se deben al *Scattering* (*Scattering* estimulado de *Brillouin* y *Scattering* estimulado *Raman*).

En el segundo capítulo se realiza el análisis del efecto no lineal “Automodulación de fase”, el cual se debe a que el índice de refracción tiene una componente dependiente de la intensidad óptica. Este efecto depende de varios parámetros como son: el parámetro no lineal $(\gamma)$, el área efectiva de la fibra $\left(A_{eff}\right)$, la longitud efectiva de la fibra óptica $\left(L_{eff}\right)$, la longitud de la fibra y principalmente la potencia óptica emitida por la fuente de luz. En este capítulo se realiza un análisis de la Automodulación de fase en cada tipo de fibra monomodo (fibra óptica monomodo estándar, de dispersión desplazada y de dispersión desplazada no nula) variando los parámetros de potencia, longitud de la fibra y la velocidad de transmisión, con el fin de determinar cuál fibra presenta la mejor respuesta ante este efecto no lineal.

El estudio incluye el análisis de los diferentes tipos de pulsos que se transmiten a través del núcleo de la fibra óptica; a manera de resumen se mencionan las características principales de los pulsos gaussianos, super-gaussianos y secantes. El estudio de la Automodulación de fase se realiza basándose en la transmisión de

pulsos ópticos gaussianos debido a que no presentan mayor complejidad en el estudio.

En el tercer capítulo se explica el funcionamiento del software NLSE Solver, el mismo que se lo utiliza para realizar las simulaciones de SPM. Una vez que se ha explicado la manera como trabaja el software, se realizan las simulaciones para comparar con los resultados matemáticos obtenidos en el capítulo 2.

Finalmente en el cuarto capítulo se realiza una recopilación de conclusiones que se obtuvieron en el desarrollo del estudio de la Automodulación de fase. Adicionalmente se indican recomendaciones, sugiriendo al lector el estudio de los otros efectos no lineales de la fibra óptica.

# PRESENTACIÓN

El presente proyecto tiene como finalidad realizar el estudio de uno de los efectos no lineales que se tiene en la fibra óptica, la Automodulación de fase. Lo que se pretende con este análisis es dar a conocer los efectos que se producen a consecuencia de usar determinados valores en los parámetros que intervienen en la transmisión de pulsos ópticos.

La razón por la cual se realiza este estudio es para poder atenuar en su mayoria dicho efecto en la transmisión y así tener una información fiable en la parte de recepción. De esta manera se puede realizar una transmisión con tasas de bits errados bajas.

Cuando la potencia de transmisión es alta, se produce el efecto de Automodulación de fase, puesto que el índice de refracción tiene una componente no lineal, la cual depende de la intensidad luminosa emitida por la fuente de luz. En este estudio no se realiza el cálculo de la potencia de entrada, existen otros efectos no lineales en los cuales se encuentra dicho valor, por lo que en este trabajo se toman valores de potencia referidas en textos.

Este estudio se lo realiza basándose principalmente en el aporte que Agrawal brinda al lector, debido a que define y explica los efectos que SPM tiene sobre los pulsos ópticos de una manera más profunda.

El complemento de lo matemático con lo gráfico es necesario para poder entender cómo los parámetros influyen en los pulsos ópticos. En este caso el software utilizado es el NLSE Solver versión 1. La desventaja de este programa es que no muestra resultados matemáticos, simplemente indica al lector los resultados gráficos. Para saber si estos resultados son correctos se recurre a la bibliografía de Agrawal donde se muestran gráficas obtenidas en experimentos de laboratorio.

El objetivo principal de este proyecto es conocer cómo se origina este efecto y cómo se lo puede controlar. Para cumplir este objetivo es necesario conocer y entender todos los parámetros que intervienen en el estudio de SPM. Los parámetros de mayor importancia son: la velocidad de transmisión, ya que ésta introduce el ensanchamiento debido a GVD (*Group Velocity Dispersion);* la potencia de entrada emitida por la fuente de luz; el parámetro no lineal (el cual a medida que aumenta, los efectos no lineales intervienen más en la transmisión), las longitudes características de la fibra óptica ya que son necesarias para conocer la evolución de los pulsos a medida que se propagan por el núcleo de la fibra óptica y el tipo de pulso óptico que se transmite.

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN SOBRE FIBRA ÓPTICA

## 1.1 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es el medio de transmisión guiado más eficiente en cuanto a ancho de banda, velocidades de transmisión, bajas atenuaciones, mayores distancias (desde las decenas de kilómetros hasta las centenas de kilómetros, pudiendo llegar a ser mayores).

El surgimiento de la fibra óptica hizo posible que las comunicaciones puedan mejorar tanto en velocidades como en distancia, pudiendo llegar a comunicar hasta dos continentes.

Es importante realizar rigurosos estudios del medio físico a fin de mantener y mejorar sus características y así lograr una transmisión mucho más eficiente y segura;para ello se debeanalizar los efectos indeseables que se producen cuando se transmite información bajo determinados parámetros (como por ejemplo la potencia de transmisión o a su vez la velocidad de transmisión) para atenuarlos en su mayoría.

En el caso de la fibra óptica existen varios efectos que disminuyen la eficiencia en la transmisión. Los efectos son de carácter tanto lineales como no lineales, posteriormente se mencionarán dichos efectos con sus principales características.

En este capítulo se contemplará los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta en la fibra óptica y se presentará las características necesarias para entender tales efectos.

### 1.1.1 Materiales utilizados en la fabricación de fibras ópticas

Existen varios materiales que pueden ser utilizados en la fabricación de la fibra, pero solo algunos de ellos tienen las características requeridas por la fibra, las cuales son:

- El material debe permitir la fabricación de fibras delgadas, flexibles y largas.
- El material debe ser transparente a una longitud de onda[1] particular para poder guiar la luz de manera eficiente.
- Finalmente, debe de ser un material que sea abundante y barato.

Dos de los materiales que cumplen con estos requisitos son el plástico y el vidrio. A continuación se indica una brevedescripción de cada uno de ellos:

#### 1.1.1.1 Fibras ópticas de vidrio [1]

La mayoría de los vidrios con los cuales se fabrican las fibras están compuestos por óxidos de vidrio. El más popular es la sílica ($SiO_2$). Un vidrio compuesto de sílica pura conocido como vidrio de sílice o sílice vítrea es el elemento principal en este tipo de fibras ópticas. El vidrio es fabricado por la fusión de óxidos de plomo, sulfuros o seleniuros.

Las ventajas de utilizar estas fibras ópticas son: su resistencia a la deformación por altas temperaturas, buena durabilidad, y alta transparencia tanto en la región visible como infrarroja que son de interés en los sistemas ópticos.Para producir dos materiales distintos y con pequeñas diferencias de índices de refracción[2]entre el núcleo y el revestimiento[3], se agregan flúor u otros óxidos al silicio.

---

1 La longitud de onda es la distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos. Se define como el cociente entre la velocidad de la luz y la frecuencia.

2 Índice de refracción.- Término a tratarse en la sección 1.1.4

3 Núcleo y revestimiento.- Término a tratarse en la sección 1.1.3

### 1.1.1.2 Fibras ópticas de plástico [2] [10]

El plástico en algunas veces es usado en lugar de la fibra óptica de vidrio. Las fibras de plástico son utilizadas en distancias cortasy donde no se requiere resistencias físicas: por ejemplo, pueden ser utilizadas para transmisiones en ambientes como el hogar, aplicaciones médicas y para la fabricación de algunos sensores donde solo se requieren longitudes cortas de fibra.

Los siguientes son algunos ejemplos de los componentes usados en las fibras de plástico:

Núcleo compuesto de poliestireno / revestimientocompuesto de metil-metacrilato.
Núcleo compuesto de polimetil-metacrilato / revestimiento compuesto de copolímero

## 1.1.2 Espectro Electromagnético[3]

La fibra óptica es un medio de transmisión guiado que se lo utiliza para la transmisión de información (voz, datos y video) en forma de pulsos de luz. Por lo tanto la fibra óptica es un medio que opera en frecuencias ópticas (infrarroja, visible y ultravioleta), las cuales se las puede observar en la siguiente gráfica:

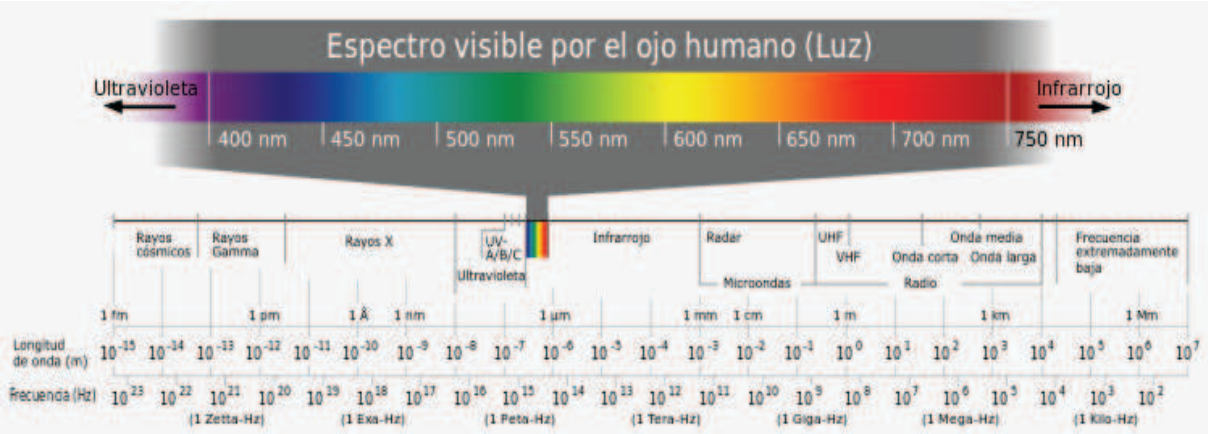



***FIGURA 1.1Espectro de frecuencias[4]***

De todo el espectro, la porción que el ser humano es capaz de ver es muy pequeña en comparación con las otras regiones espectrales. Esta región, denominada espectro visible, comprende longitudes de onda desde los 380 nm hasta los 780 nm. Para el caso de la fibra óptica, las longitudes de onda que esencialmente se utilizan para la transmisión se encuentran en un fragmento de la región infrarroja (entre los 770 nm y 1600 nm).

### 1.1.3 Estructura de la Fibra Óptica[3] [5] [8] [12]

Los hilos de fibra óptica son filamentos de vidrio (cristales naturales) o de plástico (cristales artificiales) con un espesor que puede variar de 10 a 300 micrones aproximadamente.

Básicamente una fibra es un conductor óptico que consta de un núcleo (*core*), un revestimiento (*cladding*) y una cubierta exterior (*jacket*). Cada parte constitutiva de la fibra tiene propiedades diferentes, los cuales se los aprecia en la siguiente figura:

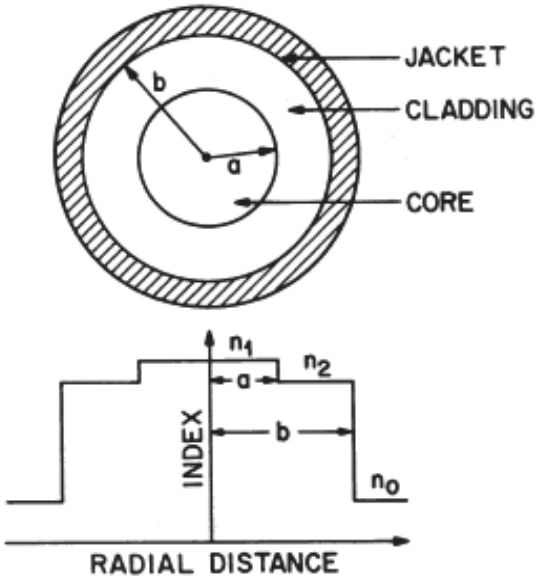



***FIGURA 1.2 Elementos de una fibra óptica[5]***

La fibra óptica tiene inmunidad a la interferencia electromagnética (*EMI*, *Electro MagneticInterference*), esto se debe a que envía pulsos de luz en vez de pulsos eléctricos, lo que se vuelve ventajoso a la hora de evitar interferencia.

La fibra óptica es el medio de transmisión que tiene el mayor ancho de banda de todos los medios guiados. Este ancho de banda puede estar en el orden de las centenas de gigahertzios por kilómetro, inclusoen la actualidad existen fibras cuyo ancho de banda llega a las unidades y decenas de los terahertzios por kilómetro. Una característica importante de la fibra es la larga distancia que puede llegar a alcanzar (en el orden de las miles de kilómetros en ciertos tipos de fibras).

Las redes ópticas de larga distancia requieren mecanismos de regeneración de las señales que restauren la calidad de las mismas y aseguren una transmisión fiable y libre de errores. Además se requiere de una sección de amplificación debido a la atenuación que sufre la señal a lo largo de la distancia de propagación.

### 1.1.4 Índice de Refracción

El índice de refracción "*n*" de un material se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en dicho material. Se debe tener en cuenta que la densidad de los materiales juega un papel importante al momento de definir el índice de refracción, es decir, mientras más denso es el material la velocidad de la luz disminuye por lo que el índice de refracción será mayor que la unidad.A continuación se muestra la expresión del índice de refracción[5]:

$$n = \frac{c}{v} \qquad \text{(Ec. 1.1)}$$

Dónde:

$c$ = velocidad de la luz en el vacío

$v$ = velocidad de la luz en el material

La expresión (Ec. 1.1) muestra el valor del índice de refracción de una sola onda incidente, sin embargo en la fibra óptica se transmiten varias ondas las cuales difieren en longitud de onda. La velocidad de propagaciónde un grupo de ondas se denomina velocidad de grupo, para la cual se define elíndice de refracción del grupo $n_g$ por medio de la relación[5]:

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \qquad \text{(Ec. 1.2)}$$

Dónde:

$n_g$: Índice de refracción de grupo.

$n$: Índice de refracción de un solo haz incidente.

$\lambda$: Longitud de onda del haz incidente.

La expresión (Ec. 1.2) es la que determina el índice de refracción en una transmisión. En la siguiente gráfica se indica la variación del índice de refracción de grupo con respecto a la longitud de onda de trabajo.

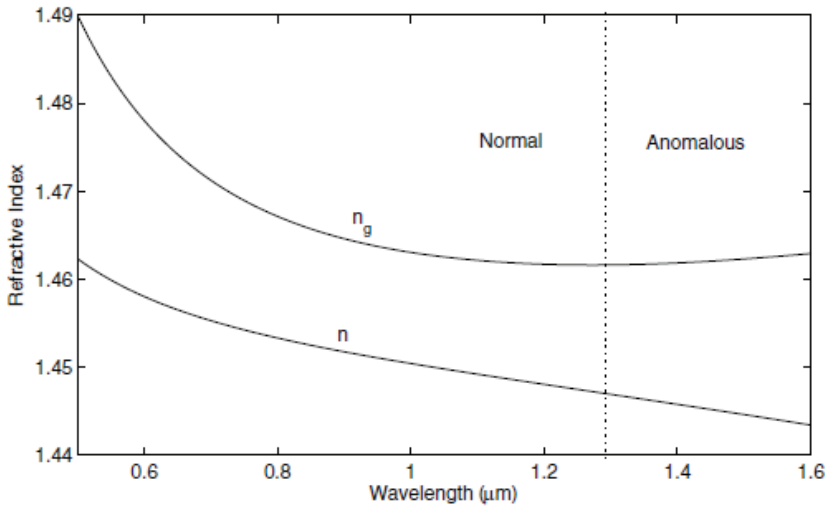



***FIGURA 1.3 Variación de $n_g$ respecto a $\lambda$[5]***

Se puede observar que el índice de refracción de grupo es mayor que el índice de refracción de un solo rayo incidente. Por lo que para realizar cualquier cálculo se debe tomar el valor del índice de refracción grupal.

### 1.1.5 Propagación de la luz sobre la fibra óptica[5] [6]

#### 1.1.5.1 Principio de refracción

La luz se propaga en línea recta a velocidad constante en un medio uniforme. Si cambia el medio, la velocidad también cambiará y la luz viajará en línea recta a lo largo de una nueva trayectoria. La desviación de un rayo de luz cuando pasa de un medio a otro se conoce como refracción.

La relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre la velocidad de la onda en el primer medio y la velocidad de la onda en el segundo medio. La explicación acerca del principio de refracción se la muestra a través de la siguiente gráfica:

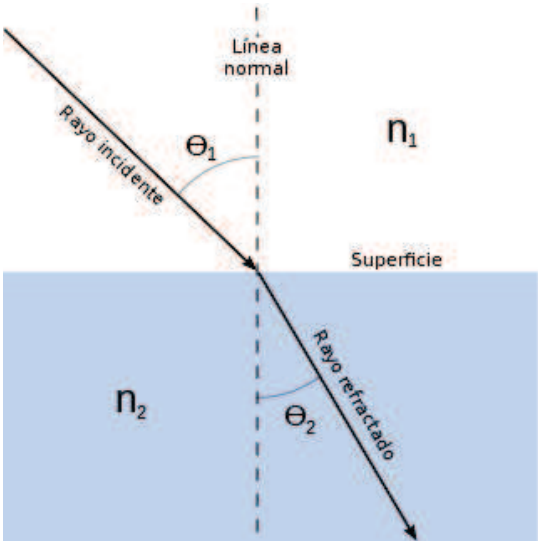



***FIGURA 1.4Ley de refracción [3]***

La siguiente expresión explica el principio de refracción [7]:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \text{(Ec. 1.3)}$$

Dónde:

- $n_1$: Índice de refracción del primer medio (núcleo de la fibra)
- $n_2$: Índice de refracción del segundo medio (revestimiento de la fibra)
- $\theta_1$: Ángulo de incidencia
- $\theta_2$: Ángulo de refracción

#### 1.1.5.2 Principio de Reflexión Total

El haz de luz emitido por el transmisor ingresa al núcleo de la fibra con un determinado ángulo de incidencia el cual se lo denotará como $\theta_1$. A medida que aumenta el ángulo de incidencia respecto al eje normal del plano de separación de los medios, aumentará el ángulo refractado$\theta_2$. Eventualmente se llegará a un valor de $\theta_1$ para el cual el rayo refractado esté contenido en dicho plano de separación, a este ángulo se lo conoce como ángulo crítico y se lo denota como $\theta_c$.

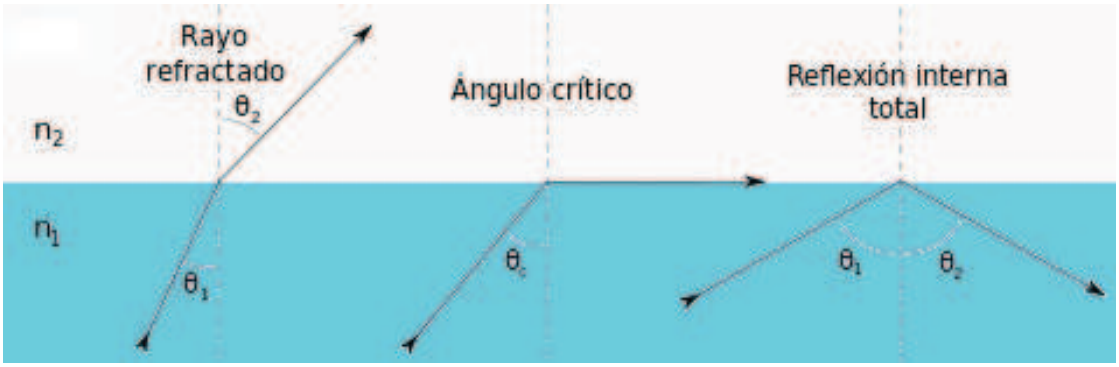



***FIGURA 1.5 Principio de Reflexión Total[8]***

Cualquier rayo de luz que incida con un ángulo mayor a $\theta_c$(respecto al eje normal) se reflejará en su totalidad. A este fenómeno se lo conoce como principio de reflexión total y posibilita la propagación de la luz a través del núcleo de la fibra óptica. Existen dos condiciones que deben cumplirse para que la luz se propague por el núcleo de la fibra óptica:

- Que el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica sea mayor que el del revestimiento, es decir$n_1 > n_2$.
- Que el ángulo de incidencia sea mayor que el valor del ángulo crítico.

### 1.1.6 Clases de Fibras Ópticas[5] [7] [15]

Para poder entender la propagación sobre el interior de una fibra óptica es necesario resolver las Ecuaciones de Maxwell. Al resolverlas se encuentra que la ecuación de propagación de la onda tiene varias soluciones, las cuales están en función del diámetro del núcleo de la fibra. A cada solución se la conoce como modo, y cada modo es una forma diferente de propagar la onda.

Las fibras ópticas se pueden clasificar por su tipo de propagación, en esta categoría las fibras se clasifican según la cantidad de modos que puede transmitir a lo largo de todo el trayecto, teniéndose dos tipos: fibras monomodo y fibras multimodo.

#### 1.1.6.1 Fibra Óptica Multimodo

Las fibras multimodo son aquellas en las que los haces de luz pueden viajar por varios caminos o modos; lo que lleva a pensar que no todos los modos llegan al receptor al mismo tiempo, pudiendo existir un tiempo de retraso entre ellos.

Una fibra multimodo puede tener miles de modos de propagación viajando a través de ella. Usualmente las fibras multimodo se usan en aplicaciones de baja velocidad que no impliquen distancias mayores a dos kilómetros.

El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior que el del revestimiento pero del mismo orden de magnitud. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectorizar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Dependiendo del tipo de índice de refracción del núcleo, se tienen dos tipos de fibras ópticas multimodo:

- Fibras Ópticas Multimodo de Índice Escalonado
- Fibras Ópticas Multimodo deÍndice Gradual

#### *1.1.6.1.1 Fibra óptica multimodo de índice escalonado*

También llamadas de salto de índice, son aquellas en las que al moverse sobre el diámetro del núcleo, el índice de refracción toma un valor constante $n_1$ desde el punto A (punto central del núcleo) hasta el borde de separación donde termina el núcleo y empieza el revestimiento, ver Figura 1.6.Cabe señalar que el índice de refracción del revestimiento también tiene un valor constante pero éste es menor que el del núcleo.

Este tipo de fibras multimodo experimenta un efecto lineal denominado dispersión modal [1], el cual se produce debido a que los modos toman diferentes caminos a lo largo de todo la trayectoria.

---

[1] Sobre la dispersión modal se lo tratará en la sección (1.3.1)

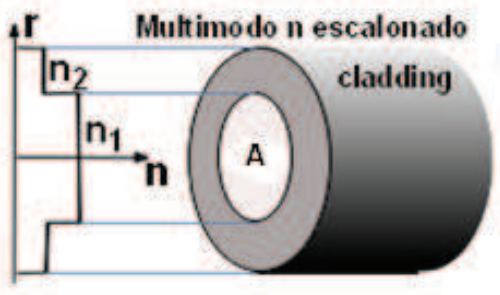



***FIGURA 1.6Fibra óptica multimodo de índice escalonado [8]***

Este tipo de fibras ópticas tienen menor costo en el mercado, ya que son las que presentan las peores condiciones de transmisión. A continuación se indican algunas características que presentan estas fibras ópticas:

- Índice de refracción del núcleo y del revestimiento son diferentes pero constantes.
- Diversos modos de propagación.
- Diferentes caminos y tiempos de recorrido de los haces de luz.
- Deformación de la señal del lado de recepción debido a los diferentes tiempos de propagación de los haces de luz produciendo distorsión de la señal (ensanchamiento de los pulsos), ver Figura 1.7.
- Ancho de banda del orden de 20 a 200 MHz x Km.

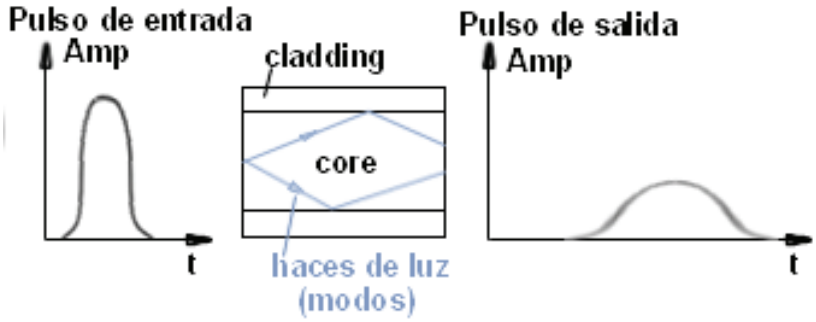



***FIGURA 1.7Ensanchamiento del pulso en una fibra óptica multimodo de índice escalonado[8]***

#### *1.1.6.1.2 Fibra óptica multimodo de índice gradual*

Este tipo de fibra tiene su núcleo compuesto por vidrios especiales con su índice de refracción variable, el cual tiene como objetivo disminuir la diferencia en los tiempos de retardo que se producen cuando los modos toman distintos caminos posibles dentro del núcleo de la fibra, como se puede apreciar en la Figura 1.8.

De esta manera se disminuye la dispersión (ensanchamiento) de los pulsos ópticos, ver Figura 1.9, aumentando el ancho de banda de la fibra óptica y consecuentemente la velocidad de transmisión. A continuación se ilustra cómo el índice de refracción varía en el núcleo de la fibra multimodo de índice gradual:

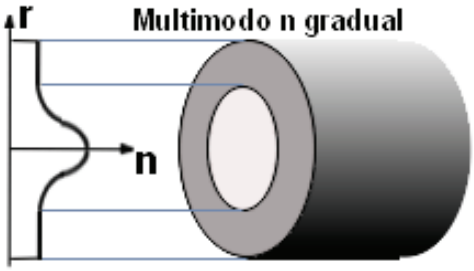



***FIGURA 1.8 Variación del índice de refracción en fibras ópticas multimodo de índice gradual [8]***

El índice de refracción de la fibra de índice gradual tiene su mayor valor en el centro del núcleo, mientras más se aleja del centro su valor va disminuyendo, de esta manera la trayectoria que toman los pulsos ópticos tiene forma curva, como se aprecia en la figura siguiente:

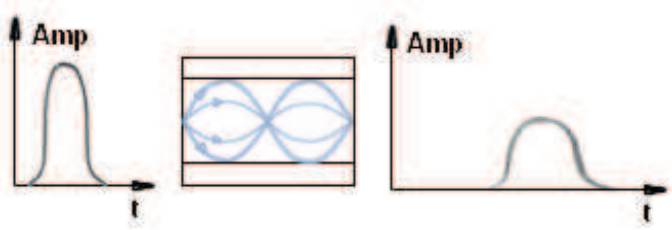



***FIGURA 1.9 Ensanchamiento del pulso en una fibra óptica multimodo de índice gradual[8]***

Cabe recalcar que cuando mayor es el índice de refracción la velocidad de transmisión es menor, así los modos que viajan más cerca del centro del núcleo se propagan con menor velocidad que los modos que viajan más lejanos del centro del núcleo, de esta manera en el receptor los haces llegan casi al mismo tiempo, lo que reduce la dispersión modal, haciendo que los pulsos no se interfieran entre sí. La fibra multimodo de índice gradual presenta las siguientes características:

- Índice de refracción del núcleo variable de forma gradual.
- Ancho de banda medio entre 500 – 1500 MHz x Km
- Trayectorias de los rayos de luz en forma curva.
- Rayos luminosos tienden a llegar al mismo tiempo al receptor.
- Solución intermedia entre la fibra multimodo de índice escalonado y la fibra monomodo.
- Su costo en el mercado es mayor que el de la fibra multimodo de índice escalonado pero menor que el de la fibra monomodo.

#### 1.1.6.2 Fibra Óptica Monomodo [3] [5] [15] [19]

Esta fibra al contrario de las anteriores, es construida de tal forma que apenas un modo sea transmitido a la vez, el cual sigue la trayectoria del eje de la fibra, de esta manera se logra eliminar la dispersión modal en los pulsos ópticos que tenían las fibras multimodo.

Para que eso ocurra, es necesario que el diámetro del núcleo sea de 5 a 6 veces mayor que la longitud de onda de la luz utilizada para la transmisión. Los materiales utilizados para la fabricación son típicamente sílice o sílice dopado.

Este tipo de fibras son empleadas usualmente en telecomunicaciones debido a su baja atenuación y al gran ancho de banda que ofrecen.

A continuación se muestra una gráfica donde se observa la propagación del pulso óptico a lo largo de la fibra monomodo, notándose el reducido ensanchamiento que éste experimenta:

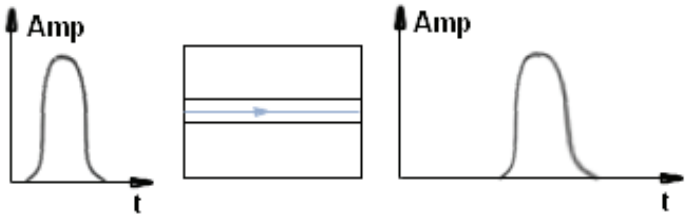



***FIGURA 1.10Propagación del pulso óptico en una fibra óptica monomodo [8]***

Las mayores velocidades de transmisión se los pueden obtener con el uso de este tipo de fibras. Dadas sus diminutas dimensiones son fibras que requieren un trato más delicado que las fibras multimodo. Una desventaja que se tiene es su costo frente a las fibras mencionadas anteriormente debido a que su fabricación es mucho más compleja, aunque en la actualidad su costo ha disminuido debido a su gran demanda.

En la siguiente gráfica se observa el corte transversal de una fibra monomodo y su correspondiente perfil de refracción, que en este caso corresponde a un perfil escalonado. A estas fibras ópticas se las denomina monomodo estándar y se la puede visualizar de mejor manera en la siguiente figura:

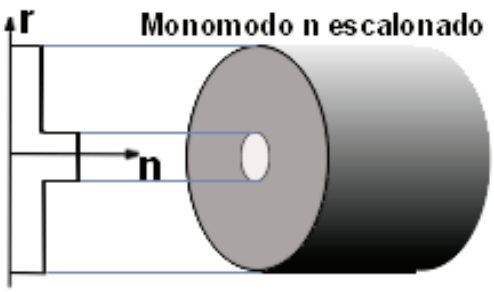



***FIGURA 1.11 Corte transversal de la fibra monomodo y perfil de índice de refracción [8]***

Las fibras ópticas monomodo estándar presentan las siguientes características:

- Transmite un solo modo a la vez.
- Índice de refracción del núcleo y del revestimiento son constantes pero diferentes.
- Ancho de banda mayor a 10 GHz x Km
- La señal (pulso) prácticamente no se deforma (ensancha) en la parte de recepción.
- Requieren un tratamiento más cuidadoso en comparación a las fibras multimodo.

## 1.2 EFECTOS LINEALES DE LA FIBRA ÓPTICA[3] [9] [10] [19]

### 1.2.1 Atenuación en las fibras ópticas

La atenuación es definida como la disminución de la potencia de una señal cuando ésta se propaga a lo largo del medio de transmisión calculada a una determinada longitud de onda. Se define con la siguiente expresión matemática[3]:

$$Atenuación\ (dB) = 10\ \log\frac{P_E}{P_S} \qquad \text{(Ec. 1.4)}$$

Dónde:

- $P_E$: potencia transmitida
- $P_S$: potencia recibida

El coeficiente de atenuación $\alpha(\lambda)$ se define como la atenuación por unidad de longitud (generalmente el km), a esa longitud de onda[3].

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L}\log\left(\frac{P_s}{P_e}\right) \qquad \text{(Ec. 1.5)}$$

La atenuación de la señal en una fibra óptica se produce por varios factores intrínsecos y extrínsecos a la fibra, de modo que en la siguiente tabla se aprecia estos factores para un mejor entendimiento:

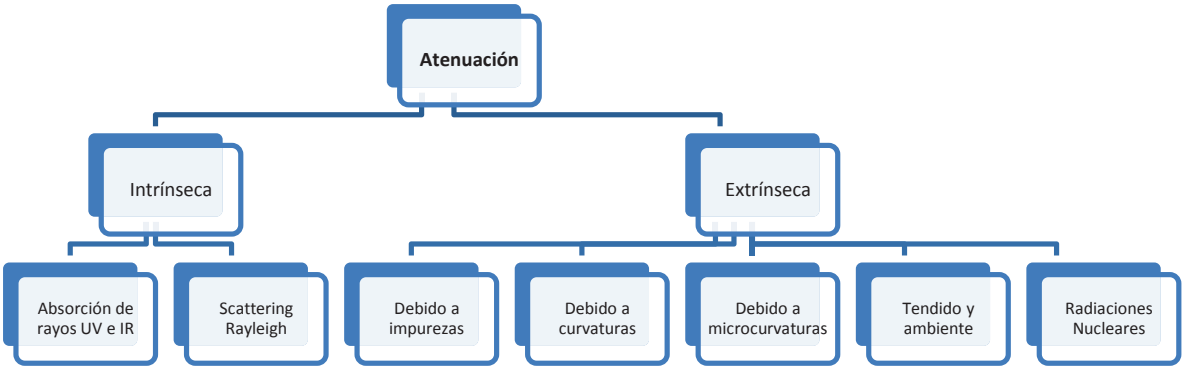



***FIGURA 1.12 Factores intrínsecos y extrínsecos de la atenuación [1]***

### 1.2.1.1 Atenuación por Factores Intrínsecos

*a) Absorción debido a rayos ultravioletas e infrarrojos*

Esta pérdida es producida por la interacción entre los fotones que viajan por la fibra y las moléculas que componen el núcleo de la misma. La energía fotónica se cede en parte a las moléculas de sílice que van encontrando los fotones en su camino, produciendo vibraciones en las mismas.

---

[1] Tabla realizada por el autor

La absorción debida a los componentes de radiación ultravioleta de la luz transmitida decrece exponencialmente con la longitud de onda, y es despreciable a partir de los 1000 nm. La atenuación debida a los rayos infrarrojos se origina por las vibraciones entre átomos de silicio y oxígeno, creciendo exponencialmente con la longitud de onda, pero no es apreciable hasta los 1400 nm.

*b) Scattering Rayleigh*

Este fenómeno de esparcimiento se produce cuando la luz encuentra en su camino partículas extrañas al medio continuo, cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda de la señal. La difracción resultante absorbe parte del espectro energético de la señal y produce una pérdida de energía que decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda[9]:

$$P = \frac{K}{\lambda^4} \qquad \text{(Ec. 1.6)}$$

Dónde:

$K$: Constante dependiente del material

$\lambda$: Longitud de onda de la luz

Las pérdidas por el efecto Rayleigh son las de mayor influencia para las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 1100 nm. Evitarlas favorece, por tanto, la utilización de longitudes de onda lo más altas posible.

| Longitud de Onda (nm) | Atenuación por efecto Rayleigh (dB/Km) |
|---|---|
| 1310 | 0.25 |
| 1550 | 0.15 |

***TABLA 1.1 Pérdidas por efecto Rayleigh[9]***

### 1.2.1.2 Atenuación por Factores Extrínsecos

La atenuación extrínseca se introduce durante la manipulación de los cables. Ejemplo serían pequeñas tensiones mecánicas (micro - torcimientos) o vulneraciones del radio de curvatura (macro - torcimientos) obteniendo como resultado que la luz se refracta fuera del núcleo. A continuación se indican dichos factores:

*a) Absorción debido a impurezas*

Los tipos de impurezas más usuales en la sílice de la fibra son las metálicas (hierro, cobalto, níquel y cromo) y los iones $OH^-$. Las impurezas metálicas originan una pérdida de 1 dB/Km si su concentración es de una parte por millón, pero al ser relativamente fácil su control en el proceso de fabricación se puede reducir al mínimo.

Los iones $OH^-$ están presentes por deposición de partículas de vapor de agua durante el proceso de fabricación, no es fácil su control, y a 2720 nm se produce resonancia de la estructura atómica de los iones con la sílice, transfiriendo los fotones su energía a los iones $OH^-$.

En la actualidad con los métodos de fabricación se considera que las impurezas iónicas no deben exceder de 30 partes por cada cien mil millones. La amplitud del pico de absorción $OH^-$no excede nunca de 1 dB/Km, habiendo conseguido picos de 0,04 dB/Km en fibras ZWP (*Zero Water Peak)*[1].

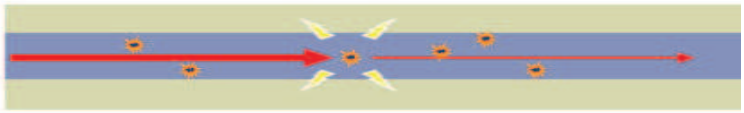


***FIGURA 1.13 Absorción debido a impurezas [12]***

[1] Fibra óptica ZWP (*Zero WaterPeak*) son fibras desarrolladas para sistemas ópticos que operan en *full-spectrum*, es decir, desde 1260 nm a 1625 nm, y en las que se ha eliminado el pico de absorción debido a iones hidroxilos.

*b) Pérdidas por curvaturas*

Cuando la fibra se somete a una curvatura se produce una atenuación adicional por el hecho de que el interfaz núcleo-revestimiento deja de ser geométricamente uniforme; la luz se refleja en algunos puntos con ángulos diferentes a los inicialmente calculados, por lo que deja de verificarse en ellos el principio de reflexión total y, en consecuencia se produce una fuga de modos hacia el revestimiento. Esta atenuación varía exponencialmente con el radio de curvatura, y es inapreciable hasta que no sobrepase una curvatura crítica.

En este tipo de atenuación, más que conocer la variación de las pérdidas por la curvatura, se debe conocer el radio de curvatura mínimo posible para un cable de fibra óptica, el cual suele ser de diez a doce veces el diámetro exterior del cable.

*c) Pérdidas por microcurvaturas*

Cada proceso de fabricación tiene sus propias tolerancias y arrastra los consiguientes errores. Los defectos que producen las pérdidas de microcurvaturas son las siguientes:

- Irregularidades entre el núcleo y el revestimiento.
- Las fluctuaciones del diámetro.

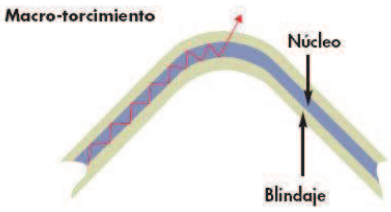



***FIGURA 1.14Pérdidas por macro-curvatura de la fibra***

Este tipo de pérdidas afectan a la información transmitida, teniendo una mínima variación con la longitud de onda. Para disminuir estas pérdidas se pueden adoptar las siguientes medidas:

- Aumentar la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento.
- Aumentar la sección de la fibra.

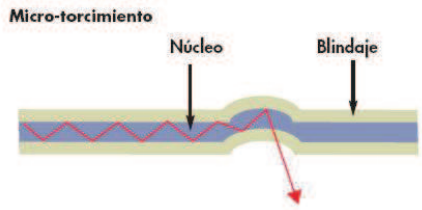



***FIGURA 1.15 Pérdidas por micro-curvatura de la fibra***

*d) Atenuación por tendido, ambiente y envejecimiento*

Al momento de instalar la fibra, ésta experimenta variaciones debido a agentes climáticos y a cierta fatiga estática debido al tendido. Estos factores contribuyen al incremento de las pérdidas.

Para evitar este tipo de pérdidas, se debe tomar en cuentas las siguientes medidas:

- Aplicar sobre el recubrimiento externo del cable una sustancia rígida, tipo nylon, de esta manera se da mayor soporte como un segundo recubrimiento.
- Colocar la fibra con su recubrimiento dentro de un segundo recubrimiento holgado, rellenando el espacio sobrante con un medio viscoso como por ejemplo el petrolato[1].

En el caso de la primera solución, la fibra tiene mayor estabilidad desde el punto de vista de la temperatura, dentro de un rango determinado. Para la segunda solución presenta un decremento en las pérdidas debido al cableado.

---

[1] Petrolato: Una gelatina que se obtiene de la destilación de residuos de aceite que queda después de la evaporación completa del aceite.

Con lo referente al envejecimiento del cable, este tipo de pérdidas ocurren una vez que el cable experimenta determinadas condiciones de tensión permanente. Además de que puede existir fisuras externas lo que aumenta las pérdidas.

*e) Radiaciones Nucleares*

Otro factor adicional de pérdidas son las producidas por las radiaciones nucleares, sobre todo si no se tratan de fibras dopadas con silicio sino con vidrios silicatados.

En este caso se produce el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton; en el primer efecto un fotón choca con un electrón transfiriendo toda su energía, desapareciendo el fotón original.

En el segundo efecto un fotón choca contra un electrón, el electrón solo adquiere parte de la energía del fotón, el resto de la energía se la lleva otro fotón de menor energía.

### 1.2.2 Atenuación Total

Después de haber expuesto todas las causas de atenuaciones que sufre la fibra óptica por varios factores, se obtiene la atenuación total que no es más que la sumatoria de todas las atenuaciones tanto intrínsecas como extrínsecas.

De la sumatoria de todas las atenuaciones y dependiendo de la longitud de onda con la que se trabaja, se ha elaborado la siguiente gráfica, en la que se muestra el coeficiente de atenuación de una fibra óptica en función de la longitud de onda.

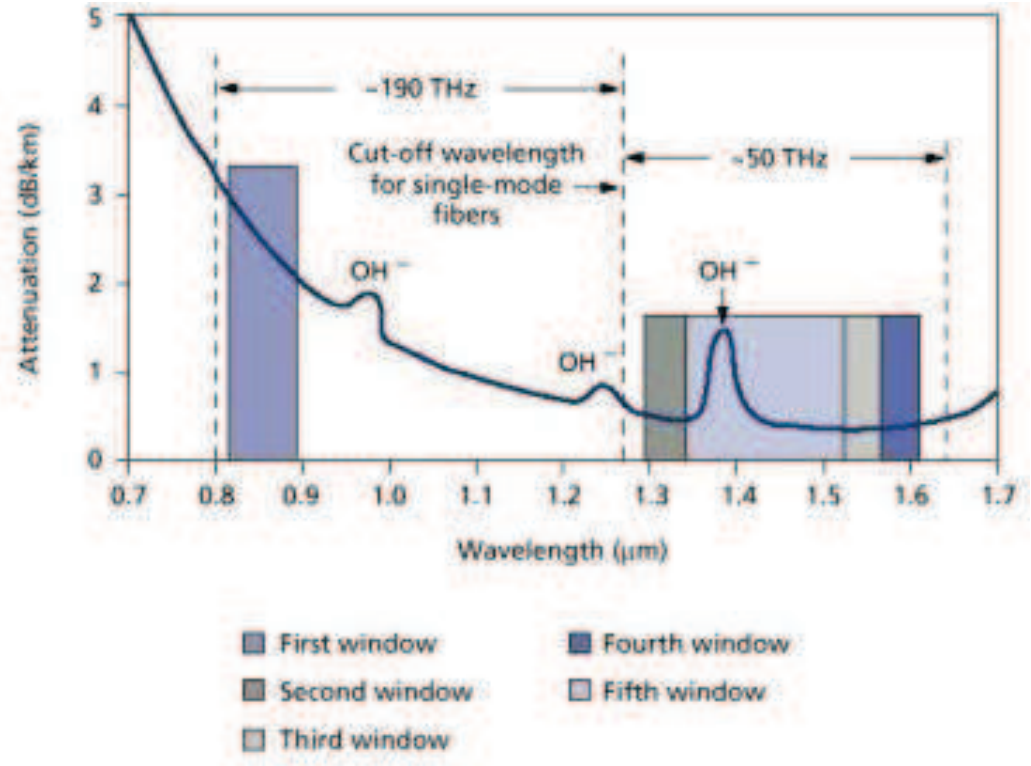



***FIGURA 1.16 Ventanas de transmisión de la fibra óptica [10]***

En la Fig. 1.16 las secciones resaltadas corresponden a las ventanas de transmisión que tiene la fibra óptica. A continuación se detalla un cuadro en donde se presentan las ventanas con sus respectivos valores de longitud de onda.

| VENTANA DE TRANSMISIÓN | LONGITUD DE ONDA |
|---|---|
| **1ra ventana** | 850 nm |
| **2da ventana** | 1310 nm |
| **3ra ventana** | 1550 nm |
| **4ta ventana** | 1625 nm |
| **5taventana** | 1470 nm |

***TABLA 1.2Ventanas de transmisión de la fibra óptica***

Como se puede observar en la gráfica por debajo de los 800 nm no es recomendable transmitir luz en una fibra óptica debido a su alto índice de atenuación.

En la zona por encima de los 1600 nm se presentan problemas de atenuación debido a los rayos infrarrojos, además de que la tecnología de emisores y fotodetectores no es muy desarrollada para esas longitudes de onda.

Los primeros sistemas de fibra trabajaron en la ventana de transmisión de 850 nm. En la actualidad los sistemas de fibra óptica trabajan en la segunda y tercera ventana de transmisión, siendo la tercera la ventana en la cual se puede alcanzar distancias superiores debido a su bajo índice de atenuación.

Se ha incorporado una cuarta ventana de transmisión en la cual se ha logrado disminuir la atenuación considerablemente.

En la actualidad se habla de una quinta ventana de transmisión la que se ha tomado relevancia en las fibras ópticas ZWP (*Zero Water Peak)*.

## 1.3 DISPERSIÓN EN FIBRA ÓPTICA [1][5] [11]

La dispersión es el fenómeno por el cual un pulso se deforma a medida que se propaga a través de la fibra óptica, debido a que las distintas componentes de la señal viajan a distintas velocidades llegando al receptor en distintos instantes de tiempo. Sin embargo, existen varios tipos de dispersión, los cuales se detallan a continuación:

- La dispersión modal
- La dispersión cromática
- La dispersión demodo de polarización

En la Figura 1.17 se visualiza los diferentes tipos de dispersión presentes en la fibra óptica:

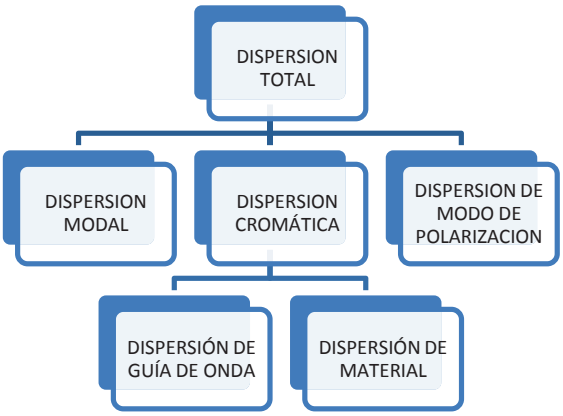



***FIGURA 1.17 Dispersión Total en la fibra óptica*** [1]

La dispersión supone una reducción del ancho de banda, pues al ensancharse los pulsos se limita la tasa de transmisión. A continuación se detallarán cada una de las distintas dispersiones mostradas en la Figura1.17.

### 1.3.1 Dispersión Modal

La dispersión modal es causada debido a que la luz viaja en trayectorias diferentes para cada modo en el núcleo de la fibra óptica, lo que produce un retardo en los tiempos de llegada al receptor. Este tipo de dispersión sólo se produce en las fibras multimodo.

Su efecto es menor en las fibras multimodo de índice gradual debido a que el índice de refracción es variable en el núcleo, lo que permite que los modos viajen a diferentes velocidades y lleguen al receptor en tiempos similares pese a que siguen trayectorias diferentes. La dispersión modal en fibras monomodo es casi nula.

Esta dispersión causa en las fibras multimodo  que el pulso de luz llegue ensanchado al receptor como, se muestra en la siguiente figura:

---

1 Gráfica realizada por el autor

***FIGURA 1.18 Dispersión Modal [12]***

La dispersión es un problema en las comunicaciones cuando se utiliza fibra óptica como medio de transmisión, ya que limita el ancho de banda. Si se envían varios pulsos en una fibra a alta velocidad, éstos se solaparán a causa de la dispersión y el receptor no podrá distinguir dónde empieza un pulso y dónde acaba el otro.

### 1.3.2 Dispersión Cromática[5] [8] [13] [16]

Los pulsos de luz propagándose a lo largo de la fibra óptica experimentan una deformación debida principalmente al ancho espectral de la señal óptica emitida por la fuente de luz. Este fenómeno produce dispersión cromática.

A continuación se señalarán las dos componentes de la dispersión cromática por separado para entender de mejor manera el impacto que tiene cada una sobre los pulsos transmitidos.

#### 1.3.2.1 Dispersión cromática de guía de onda[5] [13] [16]

Cuando el índice de refracción del núcleo difiere levemente del índice de refracción del revestimiento, parte de la luz se refracta, es decir pasa de un medio a otro (del núcleo al revestimiento).

El porcentaje de la señal refractada dependerá de la longitud de onda de la señal. Para cada longitud de onda existen diferentes trayectorias lo que implica un menor o mayor tiempo de viaje para llegar al receptor. Es así como se produce el ensanchamiento de los pulsos.

Este tipo de dispersión es relevante en fibras monomodo, dónde aproximadamente el 80% de la energía total se propaga por el núcleo mientras que la energía restante se propaga por el revestimiento, viajando por tanto a una velocidad mayor.

#### 1.3.2.2 Dispersión cromática de material [16]

El ensanchamiento del pulso debido a la dispersión del material es el resultado de las velocidades de losdistintos componentes cromáticos que forman parte del espectro de lafuente luminosa. Una fuente de luz está compuesta por un espectro de más de una longitud de onda, lo que se conoce como *anchura espectral.*

Los rayos de luz de diferentes longitudes de onda viajan a diferentes velocidades experimentando distintos retardos, dando como resultado el ensanchamiento del pulso.

Es así que la dispersión cromática total está constituida por la suma de las dos componentes:la dispersión cromática de guía de onda y de material. A esta dispersión total se le atribuye el coeficiente de dispersión cromática "*D"* expresado en ps/(nm*Km) y puede interpretarse como la diferencia de retardos por unidad de longitud recorrida y por unidad de anchura espectral de la señal.

### 1.3.3 Dispersión por modo de polarización (*PMD, PolarizationMode Dispersion)*[12][14]

Este tipo de dispersión ocurre cuando las dos componentes ortogonales de polarización, llamados modos de polarización viajan a distintas velocidad de grupo[1], llegando en distintos tiempos al final de la fibra óptica, ensanchando y distorsionando los pulsos. Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se denomina retardo diferencial de grupo (*DGD*, *Differencial Group Delay*).

Esta variación de la velocidad de grupo se produce por las características birrefringentes del medio de transmisión: la fibra óptica. La birrefringencia es el cambio en el índice de refracción "*n*" de los ejes transversales de la fibra óptica, llamados ejes de birrefringencia.

En otras palabras, cada modo de polarización de la luz se propagará en el medio con un valor distinto de índice de refracción, lo que implica que la señal original se comporta como dos ondas independientes (onda horizontal y vertical) que viajan a velocidades diferentes a lo largo de la fibra óptica.

PMD produce ensanchamientos de los pulsos ópticos transmitidos por una fibra óptica, lo que provoca interferencia entre símbolos y, por lo tanto, un aumento de la tasa de bit erróneo (*BER*, *Bits Error Rate*). Es una limitante en los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad (mayor a 10 Gbps) de larga distancia.

En la siguiente figura se observa el desfase que el pulso óptico va adquiriendo cuando éste viaja a lo largo de la fibra óptica:

---

[1] Velocidad de grupo:(Ver sección 1.1.4)

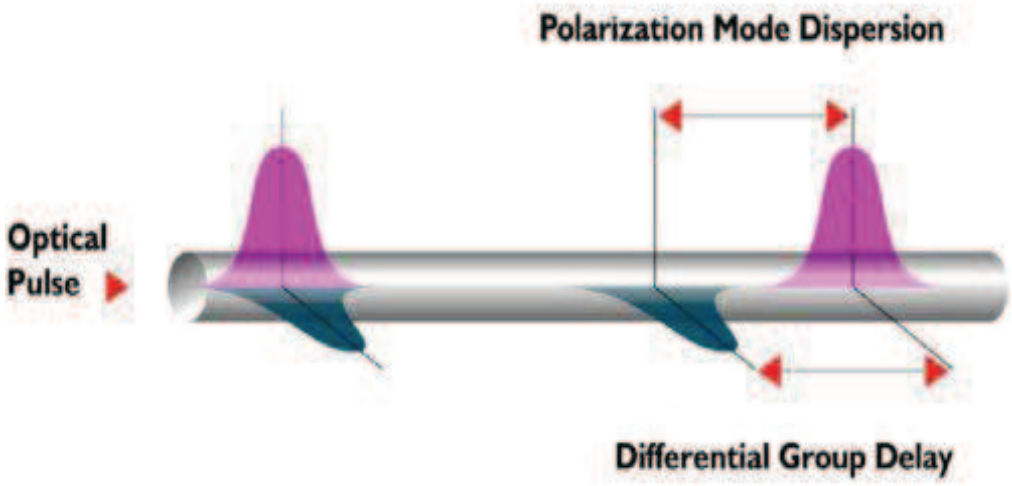



***FIGURA 1.19 Efecto de la Dispersión por Modo de Polarización [15]***

El valor de PMD es directamente proporcional a la raíz cuadrada del largo de la fibra óptica y al "coeficiente de PMD" (*$PMD_{coef}$*), de esta manera se tiene lo siguiente[15]:

$$PMD = PMD_{coef} * \sqrt{L} \qquad \text{(Ec. 1.7)}$$

Donde las unidades del coeficiente PMD son[ps/$Km^{1/2}$]. En la siguiente tabla se puede observar la diferencia entre varios valores de PMD dependiendo de la tasa de transmisión.

| Tasa de transmisión (Gbps) | Tiempo de bit (ps) | $PMD_{max}$ (ps) |
|---|---|---|
| **2,5** | 400 | 40 |
| **10** | 100 | 10 |
| **40** | 25 | 2,5 |

***TABLA 1.3 Valores de PMD típicos [15]***

# 1.4 TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO[17]

## 1.4.1 Fibra Óptica Monomodo Estándar [18]

Este tipo de fibras están contempladas en la Recomendación G.652 de la UIT, en dicha recomendación se muestra las características geométricas, mecánicas y de transmisión de un cable de fibra óptica monomodo estándar. Este tipo de fibras son óptimas cuando se transmite en la región de la longitud de onda 1310 nm.

Una de las principales características que tiene este tipo de fibras es su bajo coeficiente de atenuación $\alpha = 0.2dB/Km$ y un coeficiente de dispersión cromática $D = 16ps/(Km * nm)$.

A continuación se observa la dispersión de este tipo de fibras ópticas:

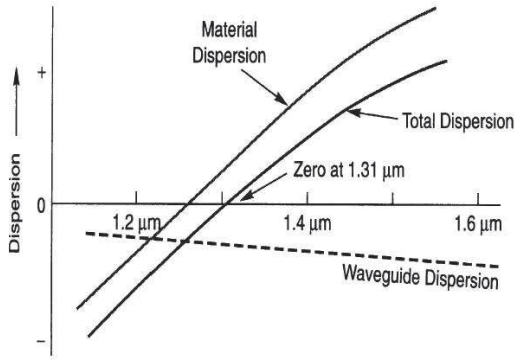



***FIGURA 1. 20 Dispersión en fibras ópticas monomodo estándar [18]***

La recomendación G.652 incluye las subcategorías G.652A, G.652B, G.652C y G.652D. Dentro de cada clase, se observa una diferencia en los valores que adquieren los coeficientes de atenuación y los coeficientes PMD, mientras que los parámetros geométricos y mecánicos no varían.

En la siguiente tabla se puede observar los parámetros geométricos y mecánicos de las fibras ópticas monomodo estándar contempladas en la recomendación G.652 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones:

| Atributos de la fibra | | |
|---|---|---|
| **Atributo** | **Dato** | **Valor** |
| Diámetro de campo modal | Longitud de onda | 1310 nm |
| | Gama de valores nominales | 8,6-9,5 μm |
| | Tolerancia | ±0,6 μm |
| Diámetro del revestimiento | Nominal | 125,0 μm |
| | Tolerancia | ±1 μm |
| Error de concentricidad del núcleo | Máximo | 0,6 μm |
| No circularidad del revestimiento | Máximo | 1,0% |
| Longitud de onda de corte del cable | Máximo | 1260 |
| Pérdida de macroflexión | Radio | 30 mm |
| | Número de vueltas | 100 |
| | Máximo a 1550 nm | 0,1 dB |
| Prueba de tensión | Mínimo | 0,69 GPa |
| Coeficiente de dispersión cromática | $\lambda_{0mín}$ | 1300 nm |
| | $\lambda_{0máx}$ | 1324 nm |
| | $S_{0máx}$ | 0,092 ps/nm$^2$ × km |
| **Atributos del cable** | | |
| **Atributo** | **Dato** | **Valor** |
| Coeficiente de atenuación | Máximo a 1310 nm | 0,5 dB/km |
| | Máximo a 1550 nm | 0,4 dB/km |
| Coeficiente de PMD | M | 20 cables |
| | Q | 0,01% |
| | $PDM_Q$ máximo | 0,5 ps/$\sqrt{km}$ |

***TABLA 1.4 Parámetros de las fibras ópticas monomodo estándar (SSMF) [17]***

A continuación se muestra las aplicaciones de las clases de fibras ópticas monomodo estándar mencionadas anteriormente:

---

1 Diámetro del campo modal.- Representa una medida del alcance transversal de la intensidad del campo electromagnético del modo en una sección transversal.

2 Longitud de onda de corte.- Es la longitud de onda más pequeña a la que puede propagarse un modo único en una fibra óptica monomodo.

| Recomendación | Aplicaciones |
|---|---|
| **G.652 A** | Soporta sistemas STM-16 y 10Gbps en Ethernet. |
| **G.652 B** | Soporta sistemas STM-64 |
| **G.652 C** | Soporta las aplicaciones del G.652A pero dentro de una gama de longitudes de onda más amplia, desde 1360 nm hasta 1530 nm. Esta clase de fibras se denominan *Zero Water Peak (ZWP).* |
| **G.652 D** | Soporta aplicaciones de la recomendación G.652A dentro del rango de longitudes de onda desde 1310 nm hasta 1550 nm. Son fibras ópticas *Zero Water Peak.* |

***TABLA 1.5 Aplicaciones de las fibras ópticas monomodo estándar [17]***

### 1.4.2 Fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada

Este tipo de fibras ópticas están contempladas dentro de la Recomendación G.653 y G.654 de la UIT. Sus siglas en inglés son *DSF (Dispersion Shifted Fiber).* Como se observó en la Fig. 1.20, la longitud de onda en la cual la dispersión cromática se anula es $\lambda = 1310\, nm$; esta longitud de onda es útil pero no ideal, por lo que resulta necesario desplazarla a $\lambda = 1550\, nm$.

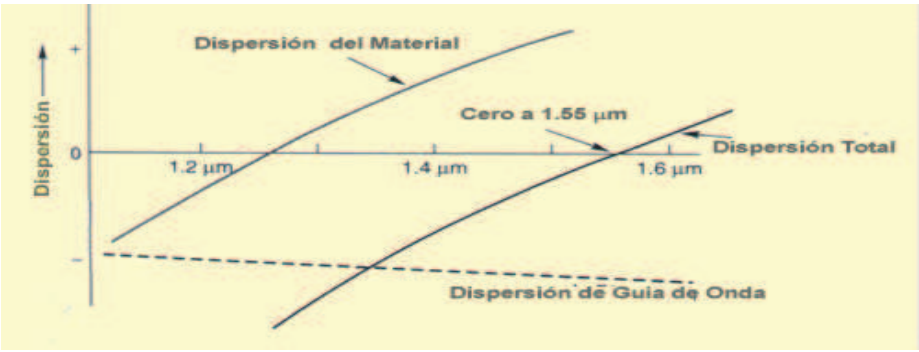



***FIGURA 1.21 Dispersión cromática desplazada nula a λ=1550 nm [18]***

### 1.4.2.1 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada – Recomendación G.653 [20]

Esta recomendación describe los atributos geométricos, mecánicos y de transmisión de la fibra óptica monomodo de dispersión nula en la longitud de onda de 1550 nm. Existen dos subcategorías en esta recomendación, la G.653A y G.653B. En las siguientes tablas se pueden observar de manera detallada las características de dichas recomendaciones:

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 7.8-8.5 µm |
| | Tolerance | ± 0.8 µm |
| Cladding diameter | Nominal | 125 µm |
| | Tolerance | ±1 µm |
| 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 | $\lambda_{0min}$ | 1525 nm |
| | $\lambda_{0max}$ | 1575 nm |
| | $D_{max}$ | 3.5 ps/(nm × km) |
| | $\lambda_{0min}$ | 1500 nm |
| | $\lambda_{0max}$ | 1600 nm |
| | $S_{0max}$ | 0.085 ps/(nm$^2$ × 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 |

***TABLA 1.6Parámetros de fibrasópticas DSF (Recomendación G.653A)[20]***

En las Tablas 1.6 y 1.7 se observan las características físicas y de transmisión de las fibras ópticas monomodo de dispersión desplazadasegún la recomendación G.653A y G.653B respectivamente.

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 7.8-8.5 µm |
| | Tolerance | ± 0.6 µm |
| Cladding diameter | Nominal | 125 µm |
| | Tolerance | ±1 µm |
| 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 × 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 |

***TABLA 1.7 Parámetros de fibras ópticas DSF (Recomendación G.653B) [21]***

Comparando las dos tablas se puede apreciar que los parámetros físicos se mantienen constantes, incluso el coeficiente de atenuación y la longitud de onda de trabajo; lo que varía entre la Tabla 1.6 y la Tabla 1.7 es el coeficiente de dispersión cromática; mientras la primera mantiene valores constantes, la segunda recomendación depende de la longitud de onda de trabajo.

### 1.4.2.2 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada – Recomendación G.654 [22]

Esta recomendación describe fibras ópticas cuya longitud de onda de corte desplazada se encuentra alrededor de los 1550 nm, puesto que el uso de estas fibras es óptimo en el rango de longitudes de onda desde 1530 a 1625 nm. Las características de estas fibras para las subcategorías G.654A y G.654B son las siguientes:

| **Fibre attributes** | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 9.5-10.5 μm |
| | Tolerance | ±0.7 μm |
| Cladding Diameter | Nominal | 125 μm |
| | Tolerance | ±1 μm |
| Core concentricity error | Maximum | 0.8 μm |
| Cladding non-circularity | Maximum | 2.0% |
| Cable cut-off wavelength | Maximum | 1530 nm |
| Macrobend loss | Radius | 37.5 mm |
| | Number of turns | 100 |
| | Maximum at 1550 nm | 0.50 dB |
| Proof stress | Minimum | 0.69 GPa |
| Chromatic dispersion coefficient | $D_{1550max}$ | 20 ps/nm·km |
| | $S_{1550max}$ | 0.070 ps/nm$^2$·km |
| Uncabled fibre PMD coefficient | Maximum | ps/√km (Note) |
| **Cable attributes** | | |
| Attenuation coefficient | Maximum at 1550 nm | 0.22 dB/km |
| PMD coefficient | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | Maximum $PMD_Q$ | 0.5 ps/√km |

***TABLA 1.8 Parámetros de fibras ópticas DSF (Recomendación G.654A) [22]***

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 9.5-13.0 µm |
| | Tolerance | ±1.0 µm |
| Cladding Diameter | Nominal | 125 µm |
| | Tolerance | ±1 µm |
| Core concentricity error | Maximum | 0.8 µm |
| Cladding non-circularity | Maximum | 2.0% |
| Cable cut-off wavelength | Maximum | 1530 nm |
| Macrobend loss | Radius | 37.5 mm |
| | Number of turns | 100 |
| | Maximum at 1550 nm | 0.50 dB |
| Proof stress | Minimum | 0.69 GPa |
| Chromatic dispersion coefficient | $D_{1550max}$ | 22 ps/nm·km |
| | $S_{1550max}$ | 0.070 ps/nm$^2$·km |
| Uncabled fibre PMD coefficient | Maximum | ps/√km (Note) |
| **Cable attributes** | | |
| Attenuation coefficient | Maximum at 1550 nm | 0.22 dB/km |
| PMD coefficient | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | Maximum $PMD_Q$ | 0.5 ps/√km |

***TABLA 1.9 Parámetros de fibras ópticas DSF (Recomendación G.654B) [22]***

### 1.4.3 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada no Nula

El diseño de una fibra de dispersión desplazada puede ser modificado para mover la dispersión cero a una longitud de onda más allá del rango de operación, esto con el objetivo de evitar la mezclas de ondas [1] que causan el problema en los sistemas que usan multiplexación de longitudes de onda. Estas fibras están optimizadas en la gama de longitudes de onda comprendidas entre 1530 nm y 1565 nm.

---

[1] Mezcla de cuatro ondas: Efecto no lineal a tratarse en la sección (1.6.1.3)

Las características de estas fibras ópticas se las puede obtener de las Recomendaciones G.655 y G.656 de la UIT, y a continuación se detallan dichas características:

#### 1.4.3.1 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada no Nula– Recomendación G.655 [24]

Esta Recomendación describe a una fibra óptica monomodo con coeficiente de dispersión cromática (valor absoluto) mayor a lo largo de las longitudes de onda mayores a 1550 nm. Esta dispersión reduce el crecimiento de los efectos no lineales (mezcla de cuatro ondas) que pueden deteriorar particularmente los sistemas de alta capacidad.

Estas fibras originalmente estaban destinadas para trabajar en el rango de longitudes de onda desde 1530 nm hasta 1565 nm. En la actualidad estas fibras ópticas se las utilizan para transmisiones en longitudes de onda superiores a 1530 nm e inferiores a 1565 nm.

Existen varias subcategorías; en el caso de las fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada no nula, así: G.655A, G.655B, G655C, G.655D y G.655E. A continuación se mostrarán las tablas con las características mecánicas, geométricas y de transmisión.

Cabe señalar que los atributos de las Recomendaciones G.655A y G.655B no entran en la última actualización de la UIT, por lo que solo se indica las tablas de las Recomendaciones G.655C, G.655D y G.655E.

A continuación se indica los atributos de la fibra óptica monomodo de dispersión desplazada nula según la Recomendación G.655C:

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 8-11 µm |
| | Tolerance | ± 0.7 µm |
| Cladding diameter | Nominal | 125 µm |
| | Tolerance | ± 1 µm |
| 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 | $\lambda_{min}$ and $\lambda_{max}$ | 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 | $\lambda_{min}$ and $\lambda_{max}$ | TBD |
| | Minimum value of $D_{min}$ | TBD |
| | Maximum value of $D_{max}$ | TBD |
| | Sign | Positive or negative |

| Cable attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Attenuation coefficient (Note 2) | Maximum at 1550 nm | 0.35 dB/km |
| | Maximum at 1625 nm | 0.4 dB/km |
| PMD coefficient (Note 3) | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | Maximum $PMD_Q$ | 0.20 ps/√km |

***TABLA 1.10 Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.655C)[24]***

A continuación se muestra las características de la Recomendación G.655D:

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 8-11 μm |
| | Tolerance | ± 0.6 μm |
| Cladding diameter | Nominal | 125 μm |
| | Tolerance | ± 1 μm |
| 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 | $\frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20$ |

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Uncabled fibre PMD coefficient | Maximum | (Note 1) |
| Attenuation coefficient (Note 2) | Maximum at 1550 nm | 0.35 dB/km |
| | Maximum at 1625 nm | 0.4 dB/km |
| PMD coefficient (Note 3) | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | Maximum $PMD_Q$ | 0.20 ps/√km |

***TABLA 1.11 Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.655D) [24]***

Y por último se muestran las características de las fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada no nula según la Recomendación G.655E.

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 8-11 μm |
| | Tolerance | ± 0.6 μm |
| Cladding diameter | Nominal | 125 μm |
| | Tolerance | ± 1 μm |
| 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 | $\frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$ |

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| | $D_{max}(\lambda)$: 1550-1625 nm | $\frac{4.12}{75}(\lambda - 1550) + 9.31$ |
| Uncabled fibre PMD coefficient | Maximum | (Note 1) |
| Attenuation coefficient (Note 2) | Maximum at 1550 nm | 0.35 dB/km |
| | Maximum at 1625 nm | 0.4 dB/km |
| PMD coefficient (Note 3) | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | Maximum $PMD_Q$ | 0.20 ps/√km |

***TABLA 1.12 Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.655E) [24]***

Al observar las características en las Tablas 1.10, 1.11 y 1.12 se puede apreciar que los parámetros que principalmente difieren son el coeficiente de dispersión cromática máximo y mínimo; además se observa que los rangos de longitudes de onda difieren puesto que en la Recomendación G.655C se transmite desde 1530 nm hasta 1625

nm, mientras que las Recomendaciones G.655D y G.655E transmiten desde 1460 nm hasta 1625 nm.

El coeficiente de atenuación se mantiene constante en las tres recomendaciones, es decir, 0,3dB/Km cuando se transmite a 1550 nm y 0,4dB/Km cuando se transmite a 1625 nm.

En la siguiente tabla se indican los valores típicos del coeficiente de dispersión cromática para cada una de las subcategorías:

| Example ID | $D_{min}$ (ps/nm·km) | $D_{max}$ (ps/nm·km) | Sign | Typical dispersion coefficient at 1550 nm (ps/nm·km) |
|---|---|---|---|---|
| A | 1.3 | 5.8 | + | 3.7 |
| B | 2.0 | 6.0 | + | 4.2 |
| C | 2.6 | 6.0 | + | 4.4 |
| D | 5.0 | 10.0 | + | 8.0 |
| E | 1.0 | 6.0 | – | –2.3 |

***TABLA 1.13 Coeficientes de Dispersión Cromática (Recomendación G.655)[24]***

### 1.4.3.2 Fibras Ópticas de Dispersión Desplazada no Nula– Recomendación G.656 [25]

Al igual que en la Recomendación G.655, el coeficiente de dispersión cromática tiene un valor alto para disminuir los efectos no lineales en los sistemas de alta velocidad de transmisión. La diferencia es que los efectos que se trata de eliminar principalmente con esta recomendación son la Mezcla de Cuatro Ondas (*FWM*, *Four Wavelenght Mixing*) [1] y la Modulación de Fase Cruzada (*XPM*, *Cross Phase Modulation*) [2].

---

[1] Mezcla de cuatro ondas.- Tema a tratarse en la sección 1.6.1.3

[2] Modulación de fase cruzada.- Tema a tratarse en la sección 1.6.1.2

A continuación se indica una tabla con las características geométricas, mecánicas y de transmisión de este tipo de fibras ópticas monomodo.

| Fibre attributes | | |
|---|---|---|
| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
| Mode field diameter | Wavelength | 1550 nm |
| | Range of nominal values | 7.0-11.0 µm |
| | Tolerance | ±0.7 µm |
| Cladding diameter | Nominal | 125.0 µm |
| | Tolerance | ±1 µm |
| 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 (ps/nm · km) | $D_{min}(\lambda)$: 1460-1550 nm | $\frac{2.60}{90}(\lambda-1460)+1.00$ |
| | $D_{min}(\lambda)$: 1550-1625 nm | $\frac{0.98}{75}(\lambda-1550)+3.60$ |
| | $D_{max}(\lambda)$: 1460-1550 nm | $\frac{4.68}{90}(\lambda-1460)+4.60$ |
| | $D_{max}(\lambda)$: 1550-1625 nm | $\frac{4.72}{75}(\lambda-1550)+9.28$ |
| Uncabled fibre PMD coefficient | Maximum | (Note 2) |

| **Attribute** | **Detail** | **Value** |
|---|---|---|
| Attenuation coefficient | Maximum at 1460 nm | 0.4 dB/km |
| | Maximum at 1550 nm | 0.35 dB/km |
| | Maximum at 1625 nm | 0.4 dB/km |
| PMD coefficient | M | 20 cables |
| | Q | 0.01% |
| | Maximum $PMD_Q$ | 0.20 ps/√km |

***TABLA 1.14 Parámetros de fibras ópticas NZ-DSF (Recomendación G.656) [25]***

El coeficiente de dispersión cromática es diferente comparado con los valores de la Recomendación G.655. Además se observa que existe un valor adicional en el

coeficiente de atenuación, es decir, cuando se transmite en la longitud de onda de 1460 nm dicho coeficiente tiene un valor de 0,4dB/Km.El diámetro del campo modal es otro atributo de la fibra que también difiere respecto de la Recomendación G.655, puesto que en esta Recomendación se observa un rango de mayor diámetro, pudiendo llegar a tener diámetros de hasta 11μm. Se puede observar que en esta recomendación no existe subcategorías.

## 1.5PARÁMETROS ASOCIADOS A LOS EFECTOS NO LINEALES[3] [5] [12] [19]

Antes de entrar en detalle en cada uno de los efectos no lineales de la fibra óptica es necesario revisar ciertos parámetros geométricos característicos de cada una de las fibras como son la longitud efectiva y el área efectiva, los cuales son fundamentales a la hora de determinar los efectos no lineales.

### 1.5.1 Longitud efectiva de una fibra óptica "$L_{eff}$"

Cuando la señal luminosa parte del transmisor, ésta al principio tiene una elevada potencia de transmisión, por lo que los efectos no lineales son importantes dentro de un rango de la longitud de la fibra.

Así que se considera a la longitud efectiva de la fibra óptica como la distancia dentro de la cual dichos efectos no lineales son considerables. Como se sabe la señal luminosa se atenúa a medida que avanza dentro del núcleo de la fibra; así que los efectos no serán importantes a lo largo de toda la distancia de la fibra, a menos que se cumpla que $L \ll L_{eff}$ . La longitud efectiva, satisface, por su propia definición la siguiente relación [5]:

$$L_{eff}\, P_o = \int_0^L P(z)dz \qquad \text{(Ec. 1.8)}$$

Donde *L* representa la longitud de la fibra. Por otra parte $P_o$ es la potencia a la salida del transmisor y $P(z)$ representa la potencia de la señal en un punto específico "z". Se debe tomar en consideración que la potencia se atenúa, por lo que la siguiente expresión indica dicho decremento [26]:

$$P(z) = P_0\, e^{-\alpha' L} \qquad \text{(Ec. 1.9)}$$

El coeficiente de atenuación es un parámetro cuya unidad es el decibel por unidad de kilómetro, por lo que resulta necesario realizar una conversión de unidades (de decibel a unidades lineales). Esta conversión de unidades se la representa mediante la expresión (Ec. 1.10), donde se puede visualizar claramente la relación que existe entre el coeficiente de atenuación en dB/Km ($\alpha$) y en unidades lineales ($\alpha'$) [26].

$$\alpha' = -\frac{10}{L}\, log\left(\frac{P_0}{P_{in}}\right) = 4{,}343\, \alpha \qquad \text{(Ec. 1.10)}$$

Una vez que se determinó el coeficiente de atenuación en unidades lineales, se debe encontrar el valor de la longitud efectiva, para lo cual se debe reemplazar la expresión (Ec. 1.9) en la ecuación (Ec. 1.8), quedando como resultado [26]:

$$L_{eff} = \frac{\left(1-e^{-\alpha L}\right)}{\alpha} \qquad \text{(Ec. 1.11)}$$

En la última expresión el valor que se obtiene de la parte exponencial es aproximadamente cero debido a que la longitud de la fibra es grande. Por lo que se la aproxima a la siguiente ecuación [26]:

$$L_{eff} \approx \frac{1}{\alpha} \qquad \text{(Ec. 1.12)}$$

### 1.5.2 Área efectiva de una fibra óptica "$A_{eff}$"[27] [28] [29] [30] [31] [32]

El área efectiva es un parámetro estrechamente relacionado con las no linealidades de la fibra óptica, las cuales afectan la calidad de la transmisión de los sistemas ópticos, especialmente en los sistemas de larga distancia con amplificación óptica.

Se define como la sección por la cual pasaría toda la potencia con densidad uniforme. Y se la denota como [5]:

$$A_{eff} = \pi k r^2 \qquad \text{(Ec. 1.13)}$$

Donde:

$r$: representa el radio del campo modal de la fibra óptica

$k$: representa el factor de corrección, ver Anexo 1.

En el siguiente cuadro se indica los valores que toma este parámetro en cada tipo de fibra óptica (SSMF, DSF y NZ-DSF):

| Tipo de fibra óptica monomodo | Valor de área efectiva |
|---|---|
| **SSMF (G.652)** | $80\,\mu m^2$ |
| **DSF (G.653)** | $45\,\mu m^2 - 55\,\mu m^2$ |
| **NZ-DSF (G.655)** | $65\,\mu m^2 - 72\,\mu m^2$ |

***TABLA 1.15 Valores de área efectiva [28][30][32]***

El valor de $72\mu m^2$ corresponde a fibras monomodo de dispersión desplazada de área extendida, ver Anexo 3. Una vez que se analizaron los parámetros relacionados a la no linealidad de la fibra óptica, se procederá a analizar cada uno de los efectos no lineales con sus respectivas características principales.

## 1.6 EFECTOS NO LINEALES DE LA FIBRA ÓPTICA[1] [5] [9] [26]

El hecho de asumir que los sistemas de comunicaciones ópticas se comportan linealmente es una aproximación adecuada cuando se opera a niveles de potencia moderados (unos pocos mW) y a velocidades de transmisión que no superen los 2.5 Gbps.

Sin embargo, a velocidades o potencias superiores ya empiezan a ser importantes los efectos de las no linealidades, y en el caso de sistemas DWDM[1] estos efectos son importantes incluso con potencias y velocidades de transmisión moderadas, condicionando el número de canales del sistema y la separación entre ellos.

Las no linealidades se pueden clasificar en dos categorías:

- Las que se producen debido a la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado (potencia de transmisión), dentro de ellas se tiene: automodulación de fase (*SPM*, *Self Phase Modulation*), modulación de fase cruzada (*CPM*, *Cross Phase Modulation*) y la mezcla de cuarto ondas (*FWM*, *Four Wavelenght Mixing*).

- Las que se producen por efectos de *scattering* en la fibra, es decir, debido a la interacción de las ondas de luz con los fonones (vibraciones moleculares) en el silicio, dentro de ellas están: scattering estimulado de Raman (*SRS*, *Stimulated Raman Scattering*) y scattering estimulado de Brillouin (*SBS*, *Stimulated Brillouin Scattering*).

---

1 Ver GLOSARIO

A continuación se detallarán los efectos no lineales por separado para una mejor comprensión. Dentro del análisis solo se detallarán los aspectos más importantes debido a que este trabajo se enfoca en el análisis de uno de los cinco efectos no lineales, la Automodulación de fase.

### 1.6.1 Efectos no Lineales debido a la Variación del Índice de Refracción

#### 1.6.1.1 Automodulación de fase (*SPM, Self Phase Modulation*)

El efecto (SPM) surge debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad óptica. Este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso.

De esta forma, las diferentes partes del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase lo que provoca que el pulso adquiera un cierto "chirp" [1], que a su vez modificará los efectos de la dispersión sobre el pulso.

El origen de los efectos no lineales está en la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la intensidad de los pulsos ópticos. Este efecto se conoce como "Efecto Kerr-Óptico" y el índice de refracción viene expresado como [26]:

$$n = n_0 + n_2 I \qquad \text{(Ec. 1.14)}$$

Donde $n_0$ es el índice de refracción de baja intensidad (y cuya dependencia con la frecuencia $\omega$ es el origen de la dispersión cromática), $n_2$ es el índice de refracción no lineal, que para fibras ópticas de silicio tiene un valor aproximado de $3x10^{-20} m^2/W$ e "$I$" es la intensidad de los pulsos transmitidos (potencia por unidad de área).

---

1 El chirp.- Se lo define como una modulación de frecuencia y no deseada a la salida del transmisor óptico.

Como consecuencia del efecto Kerr-Óptico, un pulso con potencia $P(t)$ que se propaga a través de una fibra óptica de longitud $L$ ensancha su espectro una cantidad $\Delta\,\omega$ dada por [26]:

$$\Delta\omega = \gamma\, L\, \frac{dP(t)}{dt} \qquad \text{(Ec. 1.15)}$$

Dónde $\gamma$ es el llamado parámetro no lineal expresado como [26]:

$$\gamma = \frac{n_2\,.\,\omega_0}{A_{eff}\,.\,c} \qquad \text{(Ec. 1.16)}$$

En la última expresión $\omega_0$ es la frecuencia central del pulso, $A_{eff}$ es el área efectiva del campo modal, "$c$" es la velocidad de la luz en el vacío y $n_2$ es el índice de refracción no lineal que toma valores desde 2.2x10$^{-20}$ m$^2$/W hasta 3.4x10$^{-20}$ m$^2$/W. En los sistemas de comunicaciones ópticos el parámetro $\gamma$ varía típicamente entre 1,2 y 2 (W x km)$^{-1}$[5].

El efecto de SPM, es por lo tanto, el aumentar el ancho de los pulsos transmitidos. En la práctica este efecto por sí solo no afecta el desempeño del sistema de transmisión; sin embargo, la combinación de efectos de dispersión cromática con efectos de SPM puede conducir a la degradación de los pulsos transmitidos.

Es importante notar que los efectos no lineales dependen de la potencia de la señal transmitida; recordando que ésta decrece con la atenuación de la fibra óptica, eventualmente se vuelven muy pequeños comparados con los efectos lineales. Al no despreciar la atenuación de la fibra óptica, la ecuación (Ec.1.15) se modifica[26]:

$$\Delta\omega = \gamma\, L_{eff}\, \frac{dP(t)}{dt} \qquad \text{(Ec. 1.17)}$$

### 1.6.1.2 Modulación de fase cruzada (*XPM, Cross Phase Modulation*)

Para explicar el efecto de la modulación de fase cruzada se asume que por una misma fibra óptica se transmite por dos canales de frecuencia diferentes. La modulación de fase cruzada actúa de modo semejante a la Automodulación de fase, sin embargo en el caso de la XPM, el ensanchamiento espectral que sufre un canal con potencia $P_1(t)$ en presencia de un canal $P_2(t)$ está dado por:

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP1(t)}{dt} + 2\gamma L \frac{dP2(t)}{dt} \quad \text{(Ec. 1.18)}$$

Donde, el primer término es SPM y el segundo término es XPM. Se observa que el efecto de XPM es el de producir una interacción entre diferentes canales. En presencia de dispersión este efecto conduce a la distorsión de los pulsos transmitidos y representa un factor limitante en la transmisión por sistemas de alta capacidad.

### 1.6.1.3 Mezcla de cuatro ondas (*FWM, Four Wavelenght Mixing*)

El fenómeno FWM consiste en la creación de nuevas frecuencias a partir de las frecuencias de los canales transmitidos en los sistemas de alta capacidad (sistemas DWDM). Si tres canales con frecuencias $f_i$, $f_j$ y $f_k$ se propagan por la misma fibra, la interacción de FWM producirá una nueva componente frecuencia:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad \text{(Ec. 1.19)}$$

Este efecto no lineal depende en su mayoría de la dispersión cromática de la fibra. En casos donde la dispersión de la fibra es muy baja la generación de los tonos de FWM es muy alta para determinados espaciamientos de frecuencia. La generación de nuevas frecuencias a través del mecanismo de FWM afecta al desempeño de un sistema de comunicaciones de dos formas diferentes:

- La frecuencia generada $f_{ijk}$ crece a expensas de la potencia de las frecuencias transmitidas $f_i$,$f_j$, y $f_k$.
- $f_{ijk}$ puede coincidir con la frecuencia de un cuarto canal transmitido, interfiriendo con éste y degradando la calidad de los pulsos recibidos.

Para combatir los efectos de FWM se utilizan fibras NZ-DSF que tienen dispersión cromática acotadas en el rango de longitudes de onda de interés y, posiblemente un espaciamiento en frecuencia no uniforme a lo largo de la banda de transmisión, a fin de evitar la interferencia entre las frecuencias generadas y las transmitidas.

### 1.6.2 Efectos no Lineales debido al Scattering Estimulado [5] [8] [26] [33]

#### 1.6.2.1 Scattering Estimulado de Raman (*SRS, Stimulated Raman Scattering*)

El SRS es un efecto de banda ancha mediante el cual si se introducen en una fibra dos o más señales a diferentes longitudes de onda se produce una transferencia de potencia de la señal de mayor frecuencia a la de menor frecuencia. Además el acoplo de potencia se puede producir tanto en el sentido de la propagación de las señales como en el sentido inverso, siempre y cuando en ese momento haya presencia de potencia en los dos canales. La interacción entre la onda incidente y la onda de Stokes (onda de la señal con la menor frecuencia) está gobernada por la siguiente pareja de ecuaciones [33]:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R.I_p.I_s + \alpha_s.I_s \qquad \text{(Ec. 1.20)}$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_0}{\omega_s} g_B.I_p I_s + \alpha_p.I_p \qquad \text{(Ec. 1.21)}$$

Dónde, $Ip$ es la intensidad de la onda incidente, $Is$ es la intensidad de la onda Stokes, los términos $\alpha s$ y $\alpha p$ son los coeficientes de absorción de la onda incidente y

Stokes respectivamente y $g_R$ es el coeficiente de ganancia de Raman, la cual depende de la composición del núcleo de la fibra.

En la siguiente figura se puede observar la ganancia de Raman para una fibra de silicio en función del desplazamiento de frecuencia a una longitud de onda$Lp = 1500\ nm.$

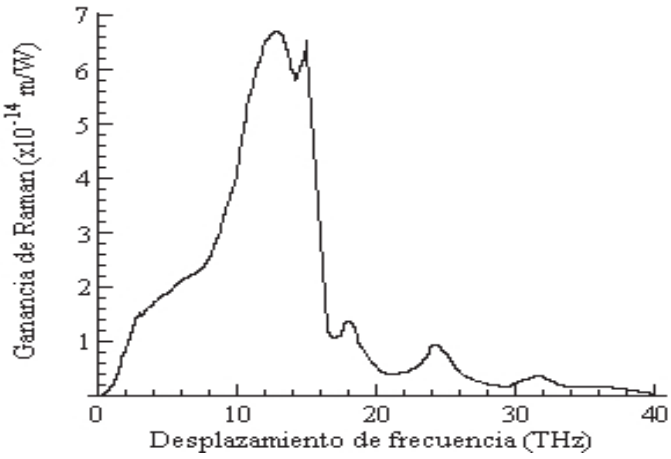



***FIGURA 1.22 Ganancia de Raman vs. Desplazamiento de Frecuencia [34]***

Lo más destacable de la ganancia de Raman es que se extiende a lo largo de un gran rango de frecuencias (hasta 40 THz), y para una longitud de onda de$Lp = 1550\ nm$alcanza un valor máximo de aproximadamente$6.67x10^{-14}\ m/W$ para un desplazamiento de frecuencia de$13.2\ THz$.

En SRS existe una potencia umbral que se define como la potencia de la onda incidente para la cual las dos ondas, incidente y Stokes, tienen a la salida de la fibra la misma potencia. Una buena aproximación para esta potencia umbral es[33]:

$$P_{umbral} = 16 * b * \frac{A_{eff}}{L_{eff} * g_R} \qquad \text{(Ec. 1.22)}$$

Donde$L_{eff}$ es la longitud efectiva de la fibra, y $b$ puede tomar un valor entre 1 y 2 dependiendo de las polarizaciones relativas de la onda incidente y Stokes[33]. El peor de los casos será para $b = 1$ ya que entonces la potencia umbral será la menor posible.

Del mismo modo, también existe una potencia umbral para la onda Stokes que se puede generar en el sentido opuesto al de la propagación de la onda incidente, y la expresión es similar, sin más que sustituir el valor 16 por 20[33]. Como el umbral para el SRS hacia adelante se alcanza antes que el umbral para el SRS hacia atrás, esa es la razón por la cual este último no se suele tener tanto en cuenta en el estudio de los sistemas de comunicaciones ópticas.

Por último cabe destacar que para reducir los efectos SRS conviene reducir al máximo el espaciado entre canales y de ser posible no superar la potencia umbral.

#### 1.6.2.2 Scattering Estimulado de Brillouin (*SBS, Stimulated Brillouin Scattering*)

Un fotón de la onda incidente desaparece para dar lugar a un fotón de frecuencia inferior y a un fonón[1] con la energía.

En el SBS la onda Stokes se propaga en el sentido opuesto al de la onda incidente, mientras que en el SRS podía propagarse en los dos sentidos, y el umbral de potencia depende de la anchura espectral de la onda incidente.

Estas diferencias se deben a que en el SBS se ven involucrados fonones acústicos en lugar de ópticos como era el caso del SRS.

---

[1] Un fonón es un modo cuantizado de vibración que se encuentra en las redes cristalina.Existen fonones de tipo acústicos y ópticos los cuales son de interés al momento de analizar los efectos de SRS y SBS.

Además en el SBS, la ganancia es conocida como ganancia de Brillouin, su espectro tiene una anchura de aproximadamente 20 MHz, y también depende de la composición del núcleo de la fibra.

Por otra parte, el coeficiente de ganancia $g_B$, es casi independiente de la longitud de onda incidente y su valor máximo para fibras de silicio es de aproximadamente $4x10^{-11}\ m/W$ y lo alcanza para un desplazamiento de frecuencia de aproximadamente$11.1\ GHz$[33].

Sin embargo, cuando la anchura espectral de la onda incidente es superior a la anchura del espectro de la ganancia, ésta se ve reducida según la siguiente expresión[33]:

$$\overline{g_B} = \frac{\Delta f_B}{\Delta f_B + \Delta f_{in}} * g_B \qquad \text{(Ec. 1.23)}$$

Donde$\Delta f_B$ equivale a la anchura espectral de la ganancia y $|\Delta f_{in}|$equivale a la anchura espectral de la onda incidente. Por lo tanto, para el caso de pulsos con una anchura $T_0$ lo suficientemente pequeña, el valor del coeficiente $g_B$ puede caer por debajo del coeficiente $g_R$.

La interacción entre la onda incidente y la onda Stokes está gobernada por una pareja de ecuaciones similar a las del SRS[33]:

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B.I_p.I_s + \alpha.I_s \qquad \text{(Ec. 1.24)}$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B.I_p.I_s + \alpha.I_p \qquad \text{(Ec. 1.25)}$$

Además como la onda incidente y la onda Stokes tienen frecuencias muy próximas, el cociente de frecuencias se puede considerar igual a 1 y el coeficiente de absorción

único e igual a $\alpha$.Con respecto a la potencia umbral en el SBS, una buena aproximación es [33]:

$$P_{umbral} = 21 * b * \frac{A_{eff}}{L_{eff} * g_B} \quad \text{(Ec. 1.26)}$$

Asumiendo $b = 1$, un valor típico de la potencia umbral para fibras de silicio es de $1.3\, mW$. Pero si $\Delta f_{in} > \Delta f_B$, la potencia umbral aumenta y la aproximación pasa a ser[33]:

$$P_{umbral} = 21 * b * \frac{A_{eff}}{L_{eff} * g_B}\left(1 + \frac{\Delta f_{in}}{\Delta f_B}\right) \quad \text{(Ec. 1.27)}$$

Por último cabe decir que para reducir los efectos de la SBS se puede optar por aumentar la anchura espectral de la onda incidente para así disminuir la ganancia de Brillouin o también procurar no superar la potencia umbral.

# CAPÍTULO 2

## ESTUDIO DE LA AUTOMODULACIÓN DE FASE

Como se mencionó en el capítulo anterior, la aparición de los efectos no lineales es consecuencia de la elevada potencia de transmisión, es decir, que si se aumenta la potencia en el transmisor, los efectos no lineales aumentarán.

Estos efectos se los estudia principalmente en fibras ópticas monomodo, ya que en éstas se necesita mayor potencia por las largas distancias que cubren. Debido a que las fibras multimodo son utilizadas en cortas distancias, la potencia del transmisor es relativamente baja, está se encuentra en el orden de los micro-watios; razón por la cual los efectos no lineales no afectan la transmisión en este tipo de fibras ópticas.

El efecto de SPM (*Self Phase Modulation*) se caracteriza por una modulación de fase de la señal óptica inducida por la potencia óptica de la misma señal. El fenómeno de SPM en fibras monomodo se produce debido a la existencia de una componente del índice de refracción dependiente de la intensidad de las señales ópticas (Efecto Kerr).

Este efecto puede ser especialmente perjudicial en combinación con la dispersión cromática, ya que la última convierte las variaciones de fase en variaciones de intensidad, esto hace que se limiten las prestaciones del sistema a la salida del fotoreceptor.

El principal efecto de SPM es ensanchar los pulsos ópticos cuando la potencia emitida por la fuente de luz es alta. En este capítulo se discutirá los efectos de la dispersión cromática y de SPM sobre los pulsos ópticos.

## 2.1 DISPERSIÓN CROMÁTICA[1] [5] [14] [15]

El origen de la dispersión cromática está relacionado a las frecuencias de resonancia en las que el medio absorbe la radiación electromagnética a través de las oscilaciones de los electrones ligados. Se puede aproximar muy bien el índice de refracción con la ecuación de Sellmeier[1].

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^{m} \frac{B_j {\omega^2}_j}{{\omega^2}_j - \omega^2} \qquad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde:

- $\omega_j = {2\pi c}/{\lambda_j}$: $\omega_j$ es la frecuencia de resonancia, $c$ es la velocidad de la luz en el vacío y $\lambda_j$ es la longitud de onda de la $j_{th}$ resonancia
- $B_j$: Es la magnitud de la $j_{th}$ resonancia.
- $m$ representa la última resonancia del análisis.

La sumatoria se extiende a lo largo de las resonancias de materiales que contribuyen a la gama de frecuencias de interés. En el caso de la fibra óptica los parámetros $B_j$ y $\omega_j$ son obtenidos experimentalmente mediante el ajuste de curvas de dispersión, además depende de cómo se encuentra constituido el núcleo de la fibra.

Para sílice fundido los valores de las frecuencias de resonancia y sus magnitudes son: $B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$ y $B_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043\ \mu m$, $\lambda_2 = 0.1162414\ \mu m$ y $\lambda_3 = 9.896161\ \mu m$[5].

---

[1] En óptica, la ecuación de Sellmeier es una relación empírica entre el índice de refracción n y la longitud de onda λ para un medio transparente particular.

La dispersión cromática en la fibra adquiere un rol importante en la propagación de pulsos ópticos cortos, debido a que diferentes componentes espectrales asociadas con el pulso viajan a velocidades diferentes según la siguiente expresión: $^{c}/_{n(\omega)}$, donde $n(\omega)$es el índice de refracción de baja intensidad que depende de la frecuencia central del pulso transmitido.

El ensanchamiento de los pulsos debido a la dispersión inducida puede ser perjudicial en los sistemas de comunicaciones.

Matemáticamente, los efectos de la dispersión cromática se los puede explicar mediante la constante de modo de propagación $\beta$ utilizando la serie de Taylor sobre la frecuencia $\omega_0$ en la que se centra el pulso. La ecuación (Ec. 2.2) indica la expresión matemática que se utiliza para determinar la dispersión cromática en la fibra óptica [5]:

$$\beta(\omega) = n(\omega)\frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \cdots \qquad \text{(Ec. 2.2)}$$

Donde, $\beta(\omega)$ representa la expresión de la dispersión cromática en función de la frecuencia con la que se transmiten los pulsos ópticos; así mismo los coeficientes de dispersión cromática están relacionados con la siguiente expresión [5]:

$$\beta_m = \left(\frac{d^m\beta}{d\,\omega^m}\right); \qquad \omega = \omega_0 \qquad \text{(Ec. 2.3)}$$

Donde, la frecuencia central del pulso $\omega_0$es utilizada para el cálculo de dichos coeficientes.

Los parámetros $\beta_1$ y $\beta_2$ están relacionados al índice de refracción $n(\omega)$ y sus derivadas a través de las ecuaciones [5]:

$$\beta_1 = \frac{1}{V_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c}\left(n + \omega \frac{dn}{d\omega}\right) \quad \text{(Ec. 2.4)}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c}\left(2\frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2}\right) \quad \text{(Ec. 2.5)}$$

Donde:

$n_g$: Es el índice de refracción del grupo

$V_g$: Es la velocidad de grupo.

Físicamente hablando, la envolvente del pulso óptico se mueve a la velocidad de grupo, mientras el parámetro $\beta_2$ representa la dispersión de la velocidad de grupo y es responsable del ensanchamiento del pulso; este fenómeno se conoce como *Dispersión de la Velocidad de Grupo (GVD, Group Velocity Dispersion),* donde $\beta_2$ se lo expresa en ps$^2$/km.

El parámetro de dispersión cromática"$D$", definido como $d\beta_1/d\lambda$también es usado en la práctica. Este parámetro relaciona a$\beta_2$ y $n$mediante la siguiente expresión[2]:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 = -\frac{\lambda}{c}\frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad \text{(Ec. 2.6)}$$

En la expresión (Ec. 2.6) se observa la relación que tiene el coeficiente de dispersión de segundo orden con el parámetro "$D$". En la siguiente gráfica se puede observar la variación de "$D$" respecto a la longitud de onda.

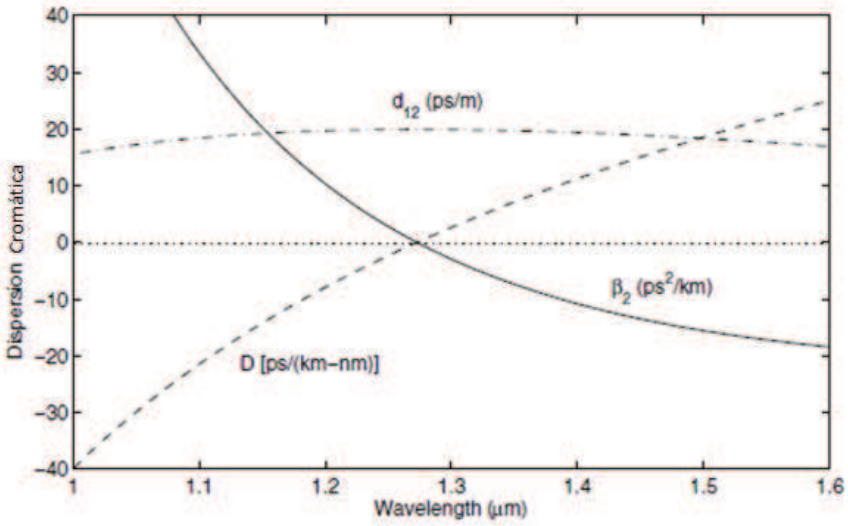



***FIGURA 2.1Variación del parámetro D respecto a la longitud de onda [5]***

Una característica importante de la dispersión cromática es que pulsos con diferentes longitudes de onda propagándose a diferentes velocidades causan un desajuste en la velocidad de grupo y el parámetro $d_{12}$ cuantifica dicho desajuste mediante la siguiente expresión[5]:

$$d_{12} = \beta_1(\lambda_1) - \beta_1(\lambda_2) = \frac{1}{V_g}(\lambda_1) - \frac{1}{V_g}(\lambda_2) \qquad \text{(Ec. 2.7)}$$

Donde:

$\lambda_1$: Representa la longitud de onda mayor

$\lambda_2$: Representa la longitud de onda menor

Se nota en la figura 2.1 que $\beta_2$ desaparece a una longitud de onda $\lambda = 1.27 m$ y llega a ser negativo para $\lambda$ mayores. Esta $\lambda$ se denomina longitud de onda de dispersión cero y es denotada como $\lambda_D$.

Los pulsos de propagación cercanos a esta longitud de onda requieren de la inclusión de un término cúbico en la (Ec. 2.2). El coeficiente $\beta_3$ que figura en este término se denomina coeficiente de dispersión de tercer orden.

Los efectos de dispersión de orden superior pueden afectar a pulsos ultracortos en el régimen lineal y no lineal. Su inclusión es necesaria solo cuando $\lambda$ se aproxima a $\lambda_D$ dentro de unos pocos nanómetros (aproximadamente 10nm).

Las fibras en las cuales la dispersión de velocidad de grupo (GVD) es desplazada a la región de $\lambda$ más allá de 1.66 μm presentan un valor alto y positivo de $\beta_2$. A estas fibras se las conoce como fibras compensadoras de dispersión.

En el régimen de dispersión normal ($\beta_2$>0), un pulso con longitud de onda más alta viaja más rápido. Mientras que lo contrario sucede en el régimen de dispersión anómalo ($\beta_2$<0).

El parámetro de dispersión de tercer orden (*TOD*, *ThirdOrder Dispersion*) se lo utiliza en pulsos que se transmiten con determinada longitud de onda cercana a la longitud de onda de dispersión cero ($\lambda_D$), esto quiere decir que $\beta_2 \approx 0$. El valor del término $\beta_3$ depende del efecto que cause GVD en los pulsos[5].

La evolución del pulso a lo largo de la fibra depende de las magnitudes que tomen $\beta_2$ y $\beta_3$. Además depende de la desviación de la longitud de onda $\lambda_0$ desde $\lambda_D$, es decir, de cual sea la separación entre dichas longitudes de onda.

Se debe tener en cuenta que valores tan bajos de $\beta_2$ solo se pueden dar si la longitud de onda de trabajo difiere de la longitud de onda de dispersión cero en $10^{-2}$nm. En la siguiente gráfica se puede observar cómo el pulso varía cuando se utilizan parámetros diferentes[5].

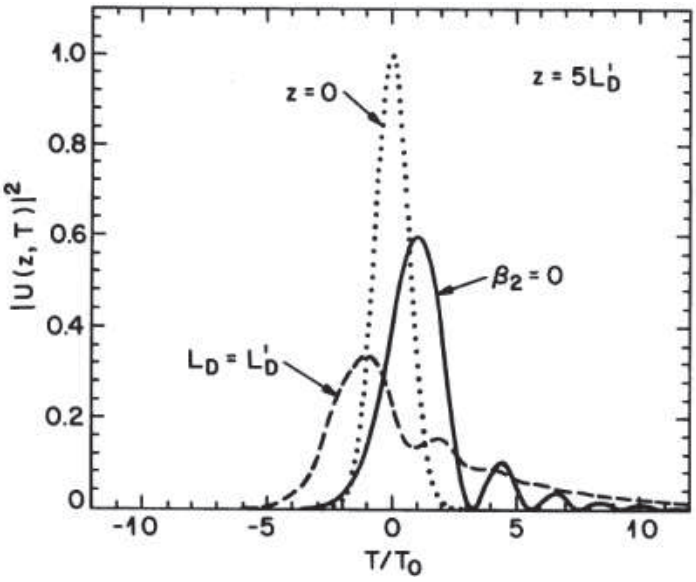



***FIGURA 2.2 Forma del pulso óptico con distintos parámetros [5]***

En el Figura 2.2 se observan tres tipos de pulsos transmitidos, el primero (líneas punteadas) hace referencia a un pulso a la salida de la fuente de luz ("*z*=0" representa la posición), es decir, sin alteraciones; el segundo (línea continua) es aquel cuya transmisión se la realiza cerca de la longitud de onda de corte y donde GVD no tiene ningún efecto, ya que el valor del coeficiente de dispersión de segundo orden es cero; y, el tercero (línea entrecortada) se trata de un pulso cuyos términos $L_D$ y $L_D{}'$ hacen referencia a valores de los coeficientes de dispersión cromática de segundo y tercer orden, los cuales de los tratará posteriormente.

## 2.2 LONGITUD DE DISPERSIÓN Y LONGITUD NO LINEAL [5] [13] [26]

Para poder determinar los efectos que tienen la Automodulación de fase en la transmisión de pulsos ópticos es necesario conocer las longitudes características puesto que así se podrá conocer la evolución de los pulsos a lo largo de la fibra óptica; estas son la longitud de dispersión y la longitud no lineal.

En la transmisión de pulsos ópticos aparece un término que relaciona el coeficiente de dispersión de segundo orden ($\beta_2$) con el ancho inicial del pulso ($T_0$) conocido como longitud de dispersión ($L_D$), que indica a partir de qué distancia los efectos dispersivos comienzan a tener importancia y se la denota mediante la siguiente expresión [26]:

$$L_D = \frac{{T_0}^2}{|\beta_2|} \quad \text{(Ec. 2.8)}$$

Otra longitud característica es la longitud no lineal$L_{NL}$, en la cual se puede observar a partir de qué distancia los efectos no lineales empiezan a tener importancia debido a su alta potencia; para esta longitud se toma en cuenta la potencia pico de entrada "$P_o$" y el coeficiente no lineal "$\gamma$"; y, su expresión corresponde a [26]:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad \text{(Ec. 2.9)}$$

Dependiendo de la longitud de la fibra ($L$), de la longitud de dispersión ($L_D$) y de la longitud no lineal ($L_{NL}$), los pulsos pueden evolucionar de manera muy diferente. Se debe tomar en cuenta que el valor de la longitud efectiva de la fibra óptica ($L_{eff}$) ayuda a conocer la evolución de los pulsos, puesto que con ella se puede determinar hasta qué distancia la potencia óptica es alta.

La longitud de dispersión y la longitud no lineal proporcionan una escala de longitud sobre la cual los efectos de dispersión y los no lineales se vuelven importantes para la degradación del pulso.

En el caso de la Automodulación de fase, se cumple que $L \ll L_D$ pero a su vez $L \approx L_{NL}$ en donde el término de dispersión es despreciable comparado con el término no lineal. En este caso la evolución del pulso es gobernada por SPM, lo que hace

que el pulso sufra un ensanchamiento en su espectro. Esto sucede cuando se trabaja en el régimen no lineal y cuando se cumple la siguiente relación [26]:

$$\frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 {T_0}^2}{|\beta_2|} \gg 1 \qquad \text{(Ec. 2.10)}$$

Como se observa en la expresión (Ec. 2.10), si la longitud de dispersión es mucho mayor que la longitud no lineal, ésta no tendrá mucha influencia en la evolución de los pulsos ópticos, lo contrario sucede en el régimen lineal. Una vez definidas las longitudes características de la fibra se debe analizar cómo intervienen en SPM, para lo cual se debe definir las expresiones que gobiernan en este efecto no lineal.

## 2.3 REFRACCIÓN NO LINEAL [5] [11] [26] [35]

La mayoría de los efectos no lineales en la fibra óptica se originan a partir de la refracción no lineal, un fenómeno en el cual el índice de refracción depende de la intensidad del pulso. La expresión que gobierna al índice de refracción está dada en la (Ec. 1.14).

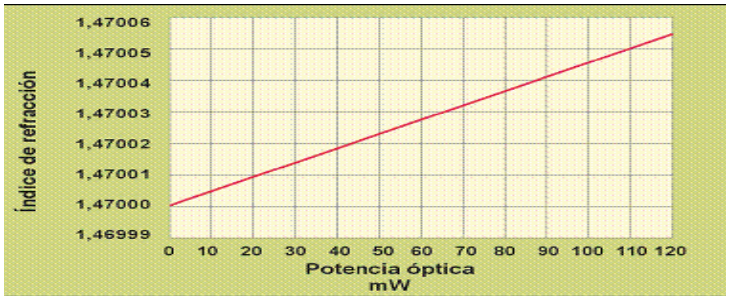



***FIGURA 2.3 Variación del índice de refracción vs la potencia óptica [35]***

En la Figura 2.3 se puede observar cómo varía el índice de refracción de grupo respecto a la potencia de transmisión.

Como se mencionó en la sección 1.6, la dependencia de la intensidad del índice de refracción conduce a efectos no lineales, los dos más estudiados debido a su

importancia en las transmisiones son la automodulación de fase (SPM) y la modulación de fase cruzada (XPM). La automodulación de fase se refiere al cambio de fase auto-inducido experimentado por un campo óptico durante su propagación en fibras ópticas. Su magnitud puede ser obtenida para observar cuánto desfase se ha producido mediante la siguiente ecuación [5]:

$$\varphi = nk_0L = (n_0 + n_2I)k_0L \qquad \text{(Ec. 2.11)}$$

Donde:

$\varphi$: representa la magnitud del desfase que sufren los pulsos ópticos

$k_0 = 2\pi/\lambda$; $\lambda$es la longitud de onda de trabajo

$L$ es la longitud de la fibra.

$I$ es la intensidad óptica ($I = P_0/A_{eff}$)

El cambio de fase que sufren los pulsos se debe a la longitud de la fibra óptica, a la longitud de onda con la que se transmiten los pulsos (la cual se relaciona con el coeficiente $k_0$) y al valor que toma el índice de refracción;se debe tomar en cuenta que este último parámetro se compone de dos partes (índice de refracción en el vacío y el índice de refracción no lineal). El índice de refracción no lineal, la intensidad óptica, la longitud de la fibra y el parámetro $k_0$producen un cambio de fase no lineal, el cual se lo define como $\varphi_{NL}$, y es el causante del ensanchamiento espectral, es decir, es aquel que incrementa el ancho espectral desde la frecuencia central del pulso; en otras palabras,la automodulación de fase se debe a $\varphi_{NL}$.

El cambio de fase no lineal incrementa con la longitud de la fibra. Entre otras cosas SPM es la responsable del ensanchamiento espectral de pulsos ultracortos en el régimen de dispersión anómalo ($\beta_2 < 0$). El máximo cambio de fase $\varphi_{max}$ ocurre en el centro del pulso localizado a T=0 seg[5]:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \gamma P_0 L_{eff} \qquad \text{(Ec. 2.12)}$$

El cambio de fase máximo ocurre cuando $L = L_{eff}$ y el coeficiente de atenuación es cero, es decir, $\alpha = 0$. El significado físico de la $L_{NL}$ es la distancia de propagación efectiva cuando $\varphi_{max} = 1$. El ensanchamiento del pulso inducido por SPM es consecuencia del desfase no lineal ($\varphi_{NL}$).

A continuación se realizará un breve análisis de las formas de los pulsos que se pueden utilizar en la transmisión por fibra óptica. Los más utilizados son los pulsos gaussianos, secantes y súper-gaussianos.

Cada uno de los pulsos se los utiliza con fines diferentes, por su forma y por la manera como se desenvuelven a lo largo de la transmisión. En este estudio el pulso que se utilizará es el gaussiano por razones que se detallarán en la sección (2.4.1).

## 2.4 TIPOS DE PULSOS ÓPTICOS [5] [26] [36]

### 2.4.1 Pulsos Gaussianos

Se define a un pulso gaussiano como aquel pulso cuya envolvente es una función gaussiana y cuando la frecuencia del pulso varía con el tiempo se dice que tiene *chirp* (nuevas componentes de frecuencia se generan continuamente a medida que el pulso se propaga por la fibra).

En el estudio de la óptica, los pulsos gaussianos se los utiliza por las siguientes razones:

- Por facilidad matemática, puesto que la transformada de Fourier de un pulso gaussiano es otro pulso gaussiano.
- Ya que los pulsos emitidos por los láseres fabricados con semiconductores, cuando se modulan directamente, adquieren un cierto chirp.

- Porque tanto en la dispersión como en algunos efectos no lineales pueden provocar que ciertos pulsos que inicialmente no tienen chirp lo adquieran al propagarse por la fibra.

La expresión matemática que se utiliza para representar un pulso gaussiano es la siguiente [5]:

$$U(0,t) = P_0\, exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right]\cos\left[\omega_0 t + \frac{C}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right] \qquad \text{(Ec. 2.13)}$$

Donde:

- $P_o$: Es la amplitud pico del pulso
- $T_o$: Corresponde a la mitad de la anchura del pulso en el punto de mayor intensidad óptica
- $C$: Es el factor de chirp, el cual determina el grado de variación de la frecuencia del pulso.
- $\omega_0$: Representa la frecuencia central del pulso transmitido.

En este estudio al parámetro “Chirp” se lo considera como un parámetro que degrada la transmisión y no se lo tomará en cuenta, tan solo se lo mencionará para indicar las expresiones de los pulsos transmitidos.

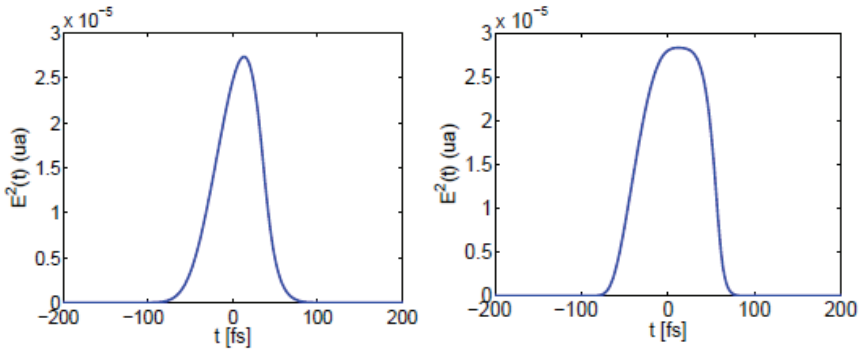
### 2.4.2 Pulsos super-gaussianos

Los pulsos super-gaussianos por su forma, sirven cuando GVD gobierna la transmisión, es decir, cuando la dispersión es un factor muy degradante. La expresión matemática que define un pulso super-gaussiano es la siguiente [5]:

$$U(0,t) = P_0\, exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^{2m}\right]\cos\left[\omega_0 t + \frac{C}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^{2m}\right] \qquad \text{(Ec. 2.14)}$$

Donde el parámetro "*m*" determina la forma de los bordes del pulso transmitido, es decir, forma al pulso de una manera más rectangular a medida que éste aumenta o lo vuelve más fino cuando éste toma el valor de uno.

Para el caso de pulsos gaussianos "*m*" toma el valor de uno, mientras que para el caso de pulsos super-gaussianos m=3. Estos valores se los utiliza para calcular el factor de nitidez de los pulsos, los cuales se los explica posteriormente en la sección 2.5. A continuación se muestra una gráfica en la cual se diferencia la forma de los pulsos gaussianos y los super-gaussianos:




(a) (b)

***FIGURA 2.4 (a) Pulso Gaussiano, (b) Pulso Super-gaussiano[26]***

### 2.4.3 Pulsos Secantes

Los pulsos secantes son otro tipo de pulsos que se utilizan cuando la transmisión requiere la introducción de solitones ópticos (pulsos de luz que viajan libres de distorsión sobre grandes longitudes de la fibra óptica como consecuencia de un balance entre los efectos dispersivos y no lineales).

Cuando se realiza el estudio de la ecuación no lineal de Schrödinger, la respuesta más estable es la respuesta que brindan los solitonesy esto solo se lo puede obtener si por el canal se transmiten pulsos ópticos secantes hiperbólicos.

Esta breve introducción de los pulsos que se transmiten por la fibra óptica es útil para entender posteriormente los ejemplos prácticos que se realizan con los pulsos gaussianos; y, con respecto a los pulsos secantes para conocer en qué instancias se los utiliza.

## 2.5 ENSANCHAMIENTO DEL ESPECTRO INDUCIDO POR SPM [5] [26]

Una vez que se explicó el significado del índice de refracción no lineal, se realizará un análisis del cambio de fase no lineal que experimentan los pulsos ópticos, para lo cual se toma en cuenta la longitud no lineal de la fibra óptica, que se la puede determinar a partir del coeficiente de dispersión de segundo grado (GVD) y del ancho inicial del pulso. Si los efectos de dispersión y no lineales son añadidos a un pulso gaussiano, el resultado que se espera tener será el siguiente [5]:

$$U(z,T) = U(0,T)exp[i\varphi_{NL}(L,T)] \qquad \text{(Ec. 2.15)}$$

Donde:

$U(z,T)$ representa la expresión de un pulso gaussiano.

$U(0,T)$ representa el pulso gaussiano inicial (cuando $z = 0$).

Se define el desfase no lineal $\varphi_{NL}(L,T)$ mediante la siguiente expresión [5]:

$$\varphi_{NL}(L,T) = |U(0,T)|^2 L_{eff}/L_{NL} \qquad \text{(Ec. 2.16)}$$

Donde:

$\varphi_{NL}(L,T)$representa el desfase no lineal tomando la longitud de la fibra óptica.

$|U(0,T)|^2$representa el módulo del pulso gaussiano en el punto inicial.

La expresión (Ec. 2.15) y (Ec. 2.16) son importantes cuando se analiza el ensanchamiento de los pulsos ópticos y el desfase temporal (desfase en el dominio del tiempo) que experimentan éstos.

En la (Ec. 2.16) se debe tomar en cuenta que la longitud efectiva depende del coeficiente de atenuación que tenga la fibra óptica (factor estandarizado según la recomendación que se utilice en el sistema de comunicación óptica).

Además en la ecuación (Ec. 2.16) se muestra que la automodulación de fase da lugar a un desfase que depende de la intensidad del pulso, sin embargo la forma del pulso no se ve afectada. Según la ecuación (Ec. 2.12) el cambio de fase no lineal aumenta con la longitud de la fibra. Se debe señalar que la longitud efectiva siempre es menor que la longitud de la fibra, si se cumple que $\alpha = 0$ y $\mathrm{L} = L_{eff}$, entonces no existen pérdidas.

El ensanchamiento espectral inducido por SPM es una consecuencia de que $\varphi_{NL}$depende del tiempo como se observa en la expresión (Ec. 2.16). Esa dependencia se la relaciona con el siguiente parámetro [5]:

$$\delta\omega = -\frac{\delta\varphi_{NL}}{\delta T} = -\left(\frac{L_{eff}}{L_{NL}}\right)\frac{\delta}{\delta T}|U(0,T)|^2 \qquad \text{(Ec. 2.17)}$$

Donde:

- $\delta\omega$**:** Se la conoce como frecuencia de Chirp
- $T$**:** Es el tiempo en el cual se realiza el análisis del pulso óptico.

El chirp inducido por SPM incrementa en magnitud con la distancia de propagación, es decir, con la distancia recorrida por los pulsos.

Hay que señalar que el ensanchamiento del pulso, no solo depende de la frecuencia de chirp generada, también depende de la forma del pulso (en este caso se toma como referencia pulsos gaussianos). Por lo que si se transmiten otros tipos de pulsos se deben tomar en cuenta que el chirp no será el mismo, para ello se utiliza la siguiente expresión que generaliza la generación de nuevas componentes de frecuencia [5]:

$$\delta\omega(T) = \frac{2m}{T_0}\frac{L_{eff}}{L_{NL}}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m-1}\left[exp\left(-\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right] \quad \text{(Ec. 2.18)}$$

Como se explicó en la sección 2.4.2, el parámetro "*m*" define el grado de nitidez de los bordes del pulso. Una forma de estimar la magnitud del ensanchamiento inducido por SPM puede ser obtenida a partir del valor pico de $\delta\omega$.

Mediante la siguiente expresión se puede calcular el ensanchamiento máximo $\delta\omega_{max}$ provocado por SPM [5]:

$$\delta\omega_{max} = \frac{mf\,(m)}{T_0}\varphi_{max} \quad \text{(Ec. 2.19)}$$

Donde $\varphi_{max}$ se puede calcular utilizando la expresión (Ec. 2.12) y $f(m)$mediante la siguiente expresión matemática[5]:

$$f(m) = 2\left(1-\frac{1}{2m}\right)^{1-\frac{1}{2m}} exp\left[-\left(1-\frac{1}{2m}\right)\right] \quad \text{(Ec. 2.20)}$$

Donde $f(m)$ representa el factor de nitidez de un pulso. Como se mencionó en la sección 2.4.2, el valor de "*m*" depende del tipo de pulso transmitido, es decir, si se está transmitiendo un pulso gaussiano m=1 y si es un pulso super-gaussiano m=3. Cabe señalar que el valor de "*m*" por sí solo indica el tipo de pulso transmitido,

mientras que $f(m)$ define el factor de nitidez de los bordes del pulso (borde de subida y borde de bajada).

Reemplazando el valor de "*m*" para un pulso gaussiano (m=1) en la expresión (Ec. 2.20), se obtiene que *f(m)=0.86*. El factor de ensanchamiento se relaciona con el ancho inicial del pulso, para lo cual se asume que se tiene un pulso gaussiano sin chirp inicial, entonces la relación queda de la siguiente manera[26]:

$$\Delta\omega_0 = {T_0}^{-1} \qquad \text{(Ec. 2.21)}$$

Donde:

$\Delta\omega_0$ Es el ancho espectral en el punto de mayor intensidad

$T_0$ Es el ancho inicial del pulso óptico

Si se reemplazan los valores obtenidos en la (Ec.2.20) y (Ec. 2.21) en la expresión (Ec. 2.19), el ensanchamiento máximo conociendo el ancho espectral inicial queda de la siguiente manera [5]:

$$\delta\omega_{max} = 0.86\,{T_0}^{-1}\varphi_{max} \qquad \text{(Ec. 2.22)}$$

Como se observa en la última expresión, se puede concluir que el ensanchamiento se debe a la contribución del desfase máximo que se produce debido a SPM y al ancho espectral inicial.

En la siguiente figura se puede observar la variación de la forma de un pulso gaussiano sin chirp cuando tiene diferentes desfases. Como se observa a medida que aumenta el desfase, existe mayor número de picos.

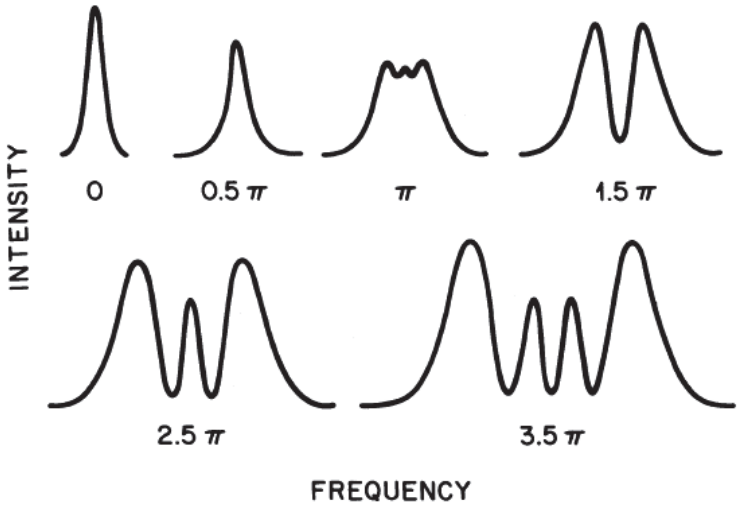



*FIGURA 2.5 Forma del pulso con varios desfases [5]*

## 2.6 EFECTOS DE DISPERSIÓN DE TERCER ORDEN (TOD) SOBRE SPM [5] [19] [26]

Como se mencionó anteriormente cuando se trabaja cerca de la longitud de onda de dispersión nula (aproximadamente 10nm de separación) se introduce un efecto ocasionado por la dispersión de tercer orden ($\beta_3$). En esta sección se analizará cómo este parámetro aporta al ensanchamiento espectral inducido por SPM.

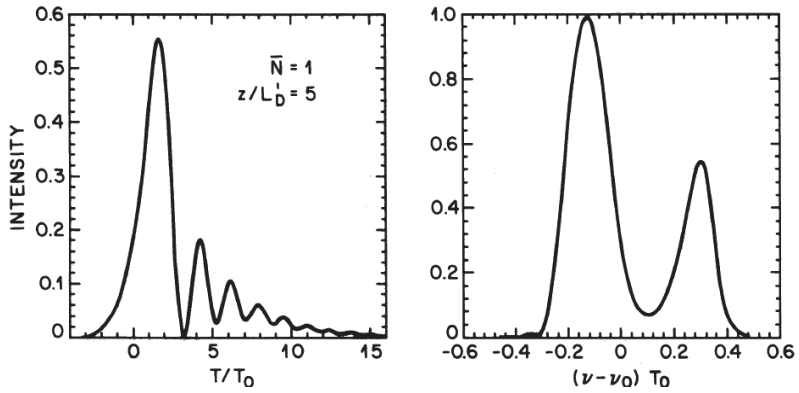



*FIGURA 2.6 Espectro del pulso gaussiano para $\bar{N} = 1$[5]*

En la Fig. 2.6 se observa que se introduce un nuevo término "$\overline{N}$" el cual indica la importancia que tiene GVD sobre SPM y que viene dado por la siguiente expresión matemática[5]:

$$\overline{N} = \frac{L'_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_o {T_0}^3}{|\beta_3|} \qquad \text{(Ec. 2.23)}$$

Donde $L_D{}'$ representa la longitud de dispersión de tercer orden y se la analiza cuando el efecto de TOD interviene en la transmisión. En este caso se desprecia el efecto de la longitud de dispersión $L_D$ya que el coeficiente de dispersión de segundo orden tiende a cero cuando se transmite cerca de la longitud de onda de corte.

Cuando $\overline{N} \gg 1$ entonces quien predomina sobre la evolución de los pulsos a través de la fibra óptica es SPM y cuando sucede lo contrario quien predomina es GVD. El efecto que tiene SPM sobre los pulsos para este caso en particular es el de aumentar las oscilaciones cerca del borde del pulso gaussiano.

Como se pudo observar, el análisis realizado anteriormente está basado esencialmente en los pulsos gaussianos, puesto que es más fácil realizar dicho análisis para estos pulsos que para los otros.

De aquí en adelante lo que se realizará son ejemplos poniendo en práctica los conceptos abordados anteriormente. Los ejemplos que serán expuestos se los realizarán basándose en valores de parámetros de las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, debido a que se puede contar con valores estandarizados y reales; del mismo modo se toman valores de áreas efectivas de fibras ópticas monomodo existentes en el mercado puesto que éste parámetro es propio de cada uno de los fabricantes.

## 2.7 EJEMPLOS PRÁCTICOS [20] [21] [22] [23] [24] [25]

En esta sección se realizará el análisis de algunos casos particulares de transmisiones utilizando fibra óptica como medio de transmisión. El estudio se lo realizará en tres escenarios diferentes, cada uno con un determinado tipo de fibra óptica monomodo (SSMF, DSF y NZ-DSF).

En cada uno de los escenarios se realizarán variaciones de velocidad de transmisión, potencias de transmisión y longitudes de fibra. Y como se mencionó en la sección 2.4.1 no se tomará en cuenta el efecto del Chirp debido a que su aporte es degradante en la transmisión.

Para este estudio se transmite pulsos ópticos gaussianos puesto que brindan mayor facilidad al momento de determinar el efecto de SPM.

### 2.7.1 Análisis de SPM para fibras ópticas monomodo estándar (*SSMF*, *Standard Single Mode Fiber*)

Mediante el siguiente esquema se observa cómo se realizarán los ejemplos en cada escenario tomando en cuenta determinados valores de longitud de la fibra, potencias de transmisión y velocidad de transmisión.

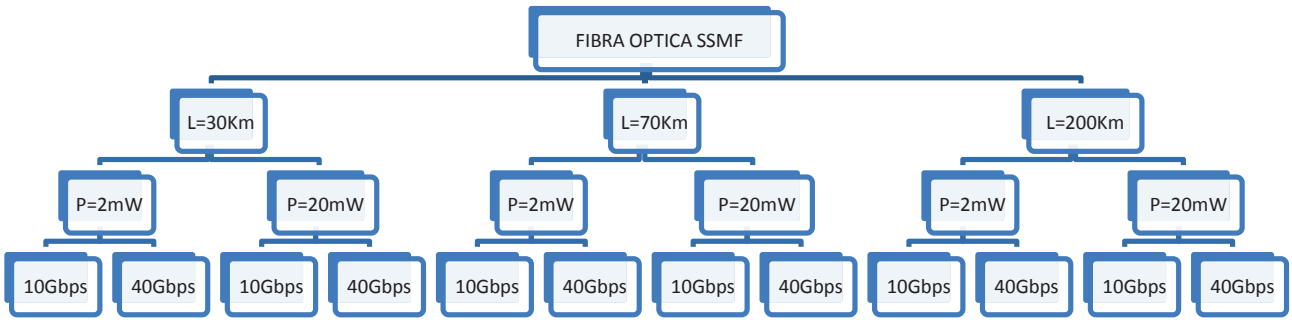



***FIGURA 2.7 Esquema de ejemplos con fibras ópticas SSMF***

El efecto no lineal SPM es importante cuando se empieza a transmitir los datos con valores de potencia a partir de los 10mW [5], es por esta razón que se toma un valor menor y uno mayor para observar cómo afecta SPM en la transmisión en ambos casos.

El área efectiva de la fibra óptica es un parámetro que no se lo detalla en las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, es por esto que se debe recurrir a los data sheets de los fabricantes para conocer este valor.

Para efectos de estudio se utiliza como referencia la fibra óptica monomodo estándar SMF-28, cuyo área efectiva del campo modal es $84\ \mu m^2$, sin dejar de lado las normas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

A continuación se señalan los parámetros de la fibra óptica monomodo estándar SMF-28 con apoyo de la Recomendación G.652.

- La longitud de onda de trabajo en fibras SSMF es 1310nm.
- El coeficiente de atenuación según la Recomendación G.652 es 0.2dB/Km.
- Coeficiente de dispersión de segundo orden: $\beta_2 = -20\, ps^2/Km$.
- El valor del índice de refracción no lineal es aproximadamente $1{,}8x10^{-20}\ W/m^2$[5].

Para poder determinar el efecto de la Automodulación de fase en la transmisión se debe determinar el valor del coeficiente no lineal, puesto que SPM depende del valor que tome dicho coeficiente.

Pero antes de determinar el coeficiente no lineal, es necesario determinar la frecuencia central sobre la cual se centran los pulsos transmitidos, que para el caso de la fibra óptica monomodo estándar es:

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{2\pi\ (3x10^8 m/s)}{1310x10^{-9}m} = 458\pi\ THz \qquad \text{(Ec. 2.24)}$$

Conociendo los valores del índice de refracción no lineal y de la frecuencia central del pulso, se puede calcular el coeficiente no lineal. Para lo cual se reemplazarán los datos obtenidos en la ecuación (Ec. 1.14) de la siguiente manera[1]:

$$\gamma = \frac{n_2\omega_0}{A_{eff}\,C} = \frac{(1{,}8x10^{-20}W/m^2)(458\pi\ THz)}{(84x10^{-11}m^2)(3x10^8 m/s)} = 1.21\frac{1}{KmW} \qquad \text{(Ec. 2.25)}$$

En la expresión (Ec. 2.25) se representa el coeficiente no lineal para el caso de una fibra óptica monomodo estándar (según la Recomendación G.652). Antes de analizar cada uno de los escenarios mencionados en el esquema de la Figura 2.7, se determinarán las longitudes efectivas, así como las longitudes no lineales y las longitudes de dispersión, a fin de tener todos los datos previamente calculados para después enfocar el análisis en SPM.

#### 2.7.1.1 Cálculo de longitudes efectivas

En primer lugar se determinarán las longitudes efectivas para una longitud de fibra óptica de 30Km, 70Km y 200Km, utilizando las expresiones (Ec. 1.10) y (Ec. 1.11):

- Cálculo de la longitud efectivade la fibra óptica, $L_{eff}$ , para L=30Km:

  Previamente se realiza el cambio de unidades del coeficiente de atenuación (recordar que las unidades del coeficiente de atenuación es dB/Km y para el cálculo de la longitud efectiva se debe tener unidades lineales).

---

[1] La frecuencia angular se la expresa como $2\pi f$. La frecuencia se la define como $f = c/\lambda$

$$\alpha' = (0{,}23)x(0{,}2dB/Km) = 0{,}046\ Km^{-1} \quad \text{(Ec. 2.26)}$$

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1-e^{-(0{,}046)(30)}}{0.046} = 16.27\ Km \quad \text{(Ec. 2.27)}$$

El valor de longitud efectiva igual a 16,27 Km indica que a dicha distancia los efectos no lineales deberán ser tomados más en consideración que los efectos de GVD debido a que la potencia de transmisión es aún elevada.

- Cálculo de la longitud efectiva de la fibra óptica, $L_{eff}$ , para L=70Km:

$$\alpha' = (0{,}23)x(0{,}2dB/Km) = 0{,}046\ Km^{-1} \quad \text{(Ec. 2.28)}$$

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1-e^{-(0{,}046)(70)}}{0.046} = 20.87\ Km \quad \text{(Ec. 2.29)}$$

Se observa que la longitud efectiva en este caso es mayor que la calculada en la expresión (Ec. 2.27), esto se debe a que la longitud de la fibra también es mayor.

- Cálculo de la longitud efectiva de la fibra óptica,$L_{eff}$ , para L=200Km:

$$\alpha' = (0{,}23)x(0{,}2dB/Km) = 0{,}046\ Km^{-1} \quad \text{(Ec. 2.30)}$$

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1-e^{-(0{,}046)(200)}}{0.046} = 21.73\ Km \quad \text{(Ec. 2.31)}$$

El valor obtenido en la expresión (Ec. 2.31) es mayor que en los dos casos anteriores, pero no difiere tanto a pesar de que la longitud de la fibra óptica incrementó notablemente; esta mínima diferencia se debe a la parte exponencial de la expresión (Ec. 1.11).

En la siguiente tabla se resume los valores calculados de las longitudes efectivas para las tres longitudes de fibra óptica:

| LONGITUD EFECTIVA EN LA FIBRA ÓPTICA MONOMODO ESTÁNDAR | | | |
|---|---|---|---|
| | **L=30Km** | **L=70Km** | **L=200Km** |
| $L_{eff}$**(Km)** | 16,27 | 20,87 | 21,73 |

***TABLA 2.1 Tabulación de longitudes efectivas para fibras ópticas SSMF***

### 2.7.1.2 Cálculo de las longitudes de dispersión y no lineales

Una vez obtenidas las longitudes efectivas en cada una de las tres longitudes de la fibra óptica monomodo estándar, se procederá a determinar las longitudes no lineales y de dispersión para cada uno de los casos. En primer lugar se determinarán los valores de las longitudes no lineales,$L_{NL}$, para ello se utilizará la expresión(Ec. 2.9):

- Cuando la transmisión se la realizacon P=2mW:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1{,}21Km^{-1})(2x10^{-3}W)} = 413{,}22Km \qquad \text{(Ec. 2.32)}$$

- Cuando la transmisión se la realiza conP=20mW:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1{,}21Km^{-1})(20x10^{-3}W)} = 41{,}32Km \qquad \text{(Ec. 2.33)}$$

Comparando los resultados obtenidos en la expresión (Ec. 2.32) y (Ec. 2.33) se puede notar que la longitud no lineal cuando se transmite con una potencia de 20mW es mucho menor que cuando se transmite con 2mW. No se puede determinar si SPM afecta en cualquiera de los dos casos hasta que no se determine los valores de la longitud efectiva y se los relacione según la ecuación (Ec. 2.12).

| LONGITUD NO LINEAL | | |
|---|---|---|
| | **P=2mW** | **P=20mW** |
| $\boldsymbol{L_{NL}\ (Km)}$ | 413,22 | 41,32 |

***TABLA 2.2 Tabulación de longitudes no lineales para fibras ópticas SSMF***

A continuación se calculará las longitudes de dispersión,$L_D$, para cada tasa de transmisión, como se mencionó en el esquema de la Figura 2.7 se asume que existen dos tasas de transmisión (10Gbps y 40Gbps), por lo que se realizará el análisis para dichas velocidades de transmisión.

Para determinar la longitud de dispersión en ambos casos, se debe calcular previamente el ancho inicial del pulso, el cual se lo define como[26]:

$$T_0 = \frac{1}{V_t} \qquad \text{(Ec. 2.34)}$$

Donde:

$V_t$:Es la velocidad de transmisión expresada en bps (bits por segundo)

Calculando los anchos iniciales para cada tasa de transmisión, quedan expresados de la siguiente manera:

$$T_0 = \frac{1}{(10x10^9 bps)} = 100ps \qquad \text{(Ec. 2.35)}$$

$$T_0 = \frac{1}{(40x10^9 bps)} = 25ps \qquad \text{(Ec. 2.36)}$$

Una vez determinados los anchos de los pulsos, se procede a calcular la longitud de dispersión,$L_D$, para cada una de las velocidades:

- Cuando la velocidad de transmisión es con $V_T = 10Gbps$:

$$L_D = \frac{{T_0}^2}{|\beta_2|} = \frac{(100ps)^2}{20ps^2/Km} = 500Km \quad \text{(Ec. 2.37)}$$

- Cuando la velocidad de transmisión es con $V_T = 40Gbps$:

$$L_D = \frac{{T_0}^2}{|\beta_2|} = \frac{(25ps)^2}{20ps^2/Km} = 31{,}25Km \quad \text{(Ec. 2.38)}$$

Observando los resultados mostrados en las ecuaciones (Ec. 2.37) y (Ec. 2.38) mientras mayor sea la velocidad de transmisión, la longitud de dispersión será menor; se puede concluir que el efecto de GVD será más importante cuando los pulsos transmitidos sean cada vez de menor duración.

Los resultados obtenidos serán tabulados a fin de utilizarlos posteriormente en cada uno de los casos mencionados en el esquema de la Figura 2.7.

| **LONGITUD DE DISPERSIÓN** | | |
|---|---|---|
| | $\boldsymbol{V_t = 10\ Gbps}$ | $\boldsymbol{V_t = 40\ Gbps}$ |
| $\boldsymbol{L_D\ (Km)}$ | 500 | 31,25 |

***TABLA 2.3 Tabulación de longitudes de dispersión para fibras ópticas SSMF***

Una vez ya obtenidos todos los datos que intervienen en el análisis de SPM, se procederá a calcular el desfase que existe en cada caso. Se mostrará al final un resumen tabulado para diferenciar los resultados con los que se obtendrán utilizando los otros tipos de fibras ópticas.

Conociendo todos los valores de los parámetros que influyen en el análisis de SPM, se procederá a analizar caso a caso, basándose en el esquema de la Figura 2.7.

Observando el esquema, el análisis parte de las tres longitudes de la fibra óptica estándar, por lo que se procederá a dividir el análisis para dichas distancias.

*2.7.1.1.1 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=30Km*

Para calcular el ensanchamiento en el espectro, se utilizarán las expresiones (Ec. 2.12) y (Ec. 2.21), ya que son las ecuaciones en las cuales se pueden realizar el reemplazo de los datos directamente.Como ya está definida la longitud de la fibra, ahora se debe escoger la potencia y velocidad de transmisión.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

A continuación se reemplazan los valores obtenidos en las tablas anteriores de la siguiente manera:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16{,}27Km}{413{,}32Km} = 0{,}039 \quad \text{(Ec. 2.39)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}039)(100x10^{-12})^{-1} = 0{,}11\pi \cong 0 \quad \text{(Ec. 2.40)}$$

Al resultado obtenido en la expresión (Ec. 2.40) se realiza una interpolación para tratar de asemejar los resultados teóricos con los de la Figura 2.5. Se observa que el desfase obtenido es casi nulo por lo tanto no existe ensanchamiento en el espectro. El mismo análisis se lo realiza cuando la potencia de transmisión es incrementada.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16{,}27Km}{41{,}32Km} = 0{,}39 \quad \text{(Ec. 2.41)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}39)(100x10^{-12})^{-1} = 1{,}1\pi \cong \pi \quad \text{(Ec. 2.42)}$$

En este último casose observa que el ensanchamiento producido por SPM es mayor debido a que el coeficiente no lineal incrementa como consecuencia de transmitir con una potencia más alta. Por lo que SPM es un factor a tomar en cuenta en la trasmisión.

Ahora a los dos casos expuestos anteriormente se los realizará una variación en la velocidad de transmisión, manteniendo constante los otros parámetros, es decir, sin modificaciones. La variación en este parámetro ayudará a observar el efecto que SMP tiene en los pulsos ópticos cuando la tasa de transmisión es incrementada.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16{,}27Km}{413{,}32Km} = 0{,}039 \qquad \text{(Ec. 2.43)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}039)(25x10^{-12})^{-1} = 0{,}42\pi \cong 0{,}5\pi \qquad \text{(Ec. 2.44)}$$

Observando la figura 2.5, el ensanchamiento pronunciado ocurre a partir de$\varphi_{max} = \pi$, por lo que en este caso no existe un ensanchamiento del espectro.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{16{,}27Km}{41{,}32Km} = 0{,}39 \qquad \text{(Ec. 2.45)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}39)(25x10^{-12})^{-1} = 4{,}2\pi \cong 5\pi \qquad \text{(Ec. 2.46)}$$

La dispersión cromática es un efecto de la fibra óptica que tiene mayor impacto en sistemas de alta velocidad; cuando existe un incremento en la velocidad de transmisión, el efecto dispersivo juega un papel importante, el cual se lo ve reflejado en la longitud de dispersión. Esta es la razón por la cual el efecto de GVD (*Group Velocity Dispersion*) ensancha los pulsos ópticos en este caso.

Este último caso muestra cómo los efectos de SPM y GVD actúan juntos en la degradación de los pulsos, ensanchando el espectro y ocasionando interferencia con canales de frecuencia adyacentes. Este ejemplo indica un sistema de comunicación con altas tasas de bits errados.

*2.7.1.1.2 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=70Km*

El mismo análisis ahora se lo realizará para una longitud de fibra óptica monomodo estándar de 70Km.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

A continuación se reemplazan los valores obtenidos e indicados en las Tablas 2.1 y 2.2 de la siguiente manera:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20{,}87Km}{413{,}32Km} = 0{,}051 \quad \text{(Ec. 2.47)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}051)(100x10^{-12})^{-1} = 0{,}14\pi \cong 0 \quad \text{(Ec. 2.48)}$$

Del mismo modo que en escenario anterior (cuando $L = 30Km$), se realiza una interpolación de resultados con el mismo fin, asemejarlos con los de la Figura 2.5. En este caso tampoco existe ensanchamiento del espectro debido a SPM ya que la potencia es baja.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20{,}87Km}{41{,}32Km} = 0{,}51 \quad \text{(Ec. 2.49)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}51)(100x10^{-12})^{-1} = 1{,}4\pi \cong 1{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.50)}$$

En este caso SPM juega un papel importante ya que $\delta\omega_{max} = 1{,}5\pi$representa un desfase pronunciado a comparación de los desfases obtenidos en los casos anteriores. Este ensanchamiento provoca un solapamiento en los canales de frecuencia produciendo interferencia.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20{,}87Km}{413{,}32Km} = 0{,}051 \quad \text{(Ec. 2.51)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}051)(25x10^{-12})^{-1} = 0{,}52\pi \cong 0{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.52)}$$

A diferencia del caso en que la velocidad de transmisión es 10Gbps, el desfase es mayor, esto se debe a que el valor de la velocidad de transmisión incrementa, provocando a su vez que la longitud de dispersiónobtenga un valor más bajo;es así que el efecto de GVD aporta en el ensanchamiento del espectro. Observando la figura 2.5, el ensanchamiento pronunciado ocurre a partir de $\delta\omega_{max} = \pi$, por lo que en este caso no existe un ensanchamiento del espectro.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{20{,}87Km}{41{,}32Km} = 0{,}51 \quad \text{(Ec. 2.53)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}51)(25x10^{-12})^{-1} = 5{,}2\pi \cong 5\pi \quad \text{(Ec. 2.54)}$$

En la práctica este resultado no esfactible, debido a que la potencia con la que se transmiten los datos es muy alta y produce efectos no lineales, puntualmente SPM. En estos casos se debe tratar de disminuir la potencia para eliminar el ensanchamiento o a su vez se debería transmitir con velocidades de transmisión menores.

*2.7.1.1.3 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=200Km*

El mismo análisis ahora se lo realizará para una longitud de fibra óptica monomodo estándar de 200Km.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

A continuación se reemplazan los valores obtenidos en las tablas 2.1 y 2.2 de la siguiente manera:

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21{,}73Km}{413{,}32Km} = 0{,}052 \quad \text{(Ec. 2.55)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}052)(100x10^{-12})^{-1} = 0{,}15\pi \cong 0 \quad \text{(Ec. 2.56)}$$

Debido a que no existe mucha diferencia entre las longitudes efectivas cuando la longitud de la fibra óptica es 70Km y 200Km, el valor del desfase no difiere

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21{,}73Km}{41{,}32Km} = 0{,}52 \quad \text{(Ec. 2.57)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}52)(100x10^{-12})^{-1} = 1{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.58)}$$

Al igual que en el caso anterior, la longitud efectiva para el caso de$L = 70Km$ y $L = 200Km$ no difieren en magnitud, por lo tanto el desfase no varía en ambos casos, es decir, el ensanchamiento producido por SPM es similar en ambos escenarios.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21{,}73Km}{413{,}32Km} = 0{,}052 \quad \text{(Ec. 2.59)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}052)(25x10^{-12})^{-1} = 0{,}56\pi \cong 0{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.60)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{21{,}73Km}{41{,}32Km} = 0{,}78 \quad \text{(Ec. 2.61)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}78)(25x10^{-12})^{-1} = 5{,}6\pi \cong 5\pi \quad \text{(Ec. 2.62)}$$

Los resultados obtenidos cuando $L = 200Km$ no varían respecto a los resultados obtenidos cuando la transmisión se la realiza con una fibra óptica monomodo estándar de longitud $L = 70Km$.

Esto se debe a que la ecuación de la longitud efectiva posee una parte exponencial decreciente, lo que permite que los valores de longitud efectiva mantengan menor diferencia a medida que la longitud de la fibra óptica aumenta.

A continuación se realizarán tablas mostrando todos los valores obtenidos e interpolados en el estudio de SPM en fibras monomodo estándar SMF-28:

| **Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF con $V_t = 10Gbps$** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2Mw | | | P=20Mw | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $\varphi_{max}$ | 0,039 | 0,051 | 0,052 | 0,39 | 0,51 | 0,52 |
| $\delta\omega_{max}$ | 0 | 0 | 0 | $\pi$ | 1,5$\pi$ | 1,5$\pi$ |

***TABLA 2.4 Resultados teóricos del estudiode SPM en fibras ópticas SSMF con $V_t$=10Gbps***

| Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF con $V_t = 40Gbps$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2mW | | | P=20mW | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $\varphi_{max}$ | 0,039 | 0,051 | 0,052 | 0,39 | 0,51 | 0,52 |
| $\delta\omega_{max}$ | $0{,}5\pi$ | $0{,}5\pi$ | $0{,}5\pi$ | $5\pi$ | $5\pi$ | $5\pi$ |

***TABLA 2.5 Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas SSMF con Vt=40Gbps***

| Valores de $\delta\omega_{max}$ (sin interpolación) obtenidos en el estudio de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2mW | | | P=20mW | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $V_T = 10Gbps$ | $0{,}11\pi$ | $0{,}14\pi$ | $0{,}15\pi$ | $1{,}1\pi$ | $1{,}4\pi$ | $1{,}5\pi$ |
| $V_T = 40Gbps$ | $0{,}42\pi$ | $0{,}52\pi$ | $0{,}56\pi$ | $4{,}2\pi$ | $5{,}2\pi$ | $5{,}6\pi$ |

***TABLA 2.6 Resultados de$\delta\omega_{max}$reales del estudio de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF***

Como se observa en las Tablas 2.4 y 2.5, se puede notar la diferencia que existe cuando la transmisión se realiza a mayor velocidad de transmisión. En el caso en que se transmite con 40Gbps, los efectos de SPM son mayores que los valores obtenidos cuando la transmisión se la realiza a 10Gbps, ya que el desfase máximo depende también del valor del ancho inicial del pulso, parámetro que se obtiene del inverso de la velocidad de transmisión. Por lo que se concluye que la tasa de transmisión es un factor importante al momento de analizar el efecto de SPM.

Como se puede observar en los resultados obtenidos en cada caso, a medida que aumenta la longitud de la fibra, los efectos no lineales incrementan (ver Tabla 2.6); esto se debe a que la longitud efectiva aumenta, consecuentemente el desfase máximo también aumenta.

Al observar los resultados tabulados, se puede notar que el peor caso es cuando la transmisión se realiza en una fibra óptica monomodo estándar de 200 Km con una potencia de 20mW a una velocidad de transmisión de 40Gbps, esto se debe a las explicaciones expuestas anteriormente.

Una vez que se observó cómo SPM ensancha el espectro en una fibra óptica monomodo estándar, se procederá a realizar el mismo análisis para los otros dos tipos de fibras ópticas monomodo (DSF y NZ-DSF).

### 2.7.2 Análisis de SPM para fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada (*DSF, Dispersion Shifted Fiber*)

El análisis se lo realizará basándose en el siguiente esquema similar al de la figura 2.7:

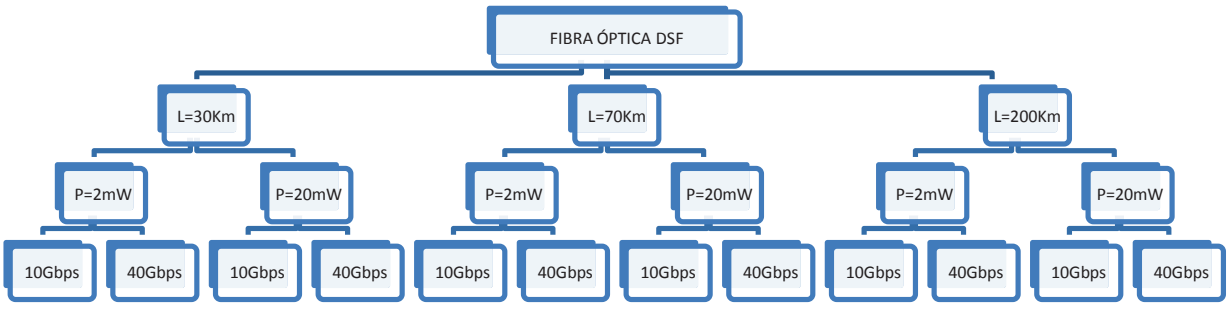



***FIGURA 2.8Esquema de ejemplos con fibras ópticas monomodo DSF***

Para poder realizar el análisis, se debe en primer lugar indicar los parámetros de la fibra óptica monomodo de dispersión desplazada:

- La longitud de onda de trabajo para fibras DSF es 1550nm.
- El coeficiente de atenuación según la Recomendación G.653A es 0.35dB/Km.
- El área efectiva de una fibra DSF es aproximadamente 55$\mu m^2$, ver Anexo 2.

- Coeficiente de dispersión de segundo orden: $\beta_2 = -20\, ps^2/Km$. [5].
- El valor del índice de refracción no lineal para fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada DSF es $3x10^{-20}\, m^2/W$. [5]

Los valores indicados están relacionados con las fibras ópticas monomodo DSF de la Recomendación G.653A. A continuación se determinará la frecuencia central de los pulsos, término necesario para el cálculo del coeficiente no lineal:

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{2\pi(3x10^8 m/s)}{1550\ x10^{-9} m} = 378\ THz \qquad \text{(Ec. 2.63)}$$

Una vez determinada la frecuencia central del pulso óptico se procede a calcular el coeficiente no lineal:

$$\gamma = \frac{n_2\omega_0}{A_{eff}\, C} = \frac{(3x10^{-20} m^2/W)(378\pi THz)}{(55x10^{-11} m^2)(3x10^8 m/s)} = 1.4\frac{1}{KmW} \qquad \text{(Ec. 2.64)}$$

Como se observa en la expresión (Ec. 2.64), el valor del parámetro no lineal es mayor que el calculado en el caso de SSMF, esto se debe a que el área efectiva de esta fibra es menor, haciendo que los efectos no lineales sean tomados más en cuenta.

Se debe calcular los valores de las longitudes efectivas puesto que el coeficiente de atenuación es mayor a diferencia de las fibras ópticas monomodo estándar.

#### 2.7.2.1 Cálculo de las longitudes efectivas

Una vez más tomando como referencia las expresiones (Ec. 1.9) y (Ec. 1.10), se procede a determinar los valores de las longitudes efectivas en fibras DSF.

- Cálculo de la longitud efectiva de la fibra óptica para L=30Km:

$$\alpha' = (0{,}23)x(0{,}35dB/Km) = 0{,}0805Km^{-1} \quad \text{(Ec. 2.65)}$$

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1-e^{-(0{,}0805)(30)}}{0.0805} = 11.31\ Km \quad \text{(Ec. 2.66)}$$

- Cálculo de la longitud efectiva de la fibra óptica para L=70Km:

$$\alpha' = (0{,}23)x(0{,}35dB/Km) = 0{,}0805Km^{-1} \quad \text{(Ec. 2.67)}$$

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1-e^{-(0{,}0805)(70)}}{0.0805} = 12.37\ Km \quad \text{(Ec. 2.68)}$$

- Cálculo de la longitud efectiva de la fibra óptica para L=200Km:

$$\alpha' = (0{,}23)x(0{,}35dB/Km) = 0{,}0805Km^{-1} \quad \text{(Ec. 2.69)}$$

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1-e^{-(0{,}0805)(200)}}{0.0805} = 12{,}42\ Km \quad \text{(Ec. 2.70)}$$

Los resultados obtenidos en el cálculo de las longitudes efectivas se recopilan en la siguiente tabla:

| LONGITUD EFECTIVA EN LA FIBRA ÓPTICA MONOMODO DSF | | | |
|---|---|---|---|
| | **L=30Km** | **L=70Km** | **L=200Km** |
| $L_{eff}$**(Km)** | 11,31 | 12,37 | 12,42 |

***TABLA 2.7 Tabulación de longitudes efectivas en fibras ópticas DSF***

Comparando con el valor obtenido en el caso de la fibra SSMF, se observa que la longitud efectiva es menor ya que el valor del coeficiente de atenuación es mayor.

### 2.7.2.2 Cálculo de las longitudes de dispersión y no lineales

Con respecto a las longitudes de dispersión, los valores son los mismos que los calculados en fibras SSMF puesto que no se ha cambiado ni el valor de la velocidad de transmisión ni el coeficiente de dispersión de segundo orden, es decir, los valores en las expresiones (Ec. 2.37) y (Ec. 2.38) serán utilizados en este caso. Mientras que para la longitud no lineal, se la calcula a continuación:

- Cuando la transmisión se la realiza con P=2mW:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1.4\,W^{-1}Km^{-1})(2x10^{-3}W)} = 333.33Km \qquad \text{(Ec. 2.71)}$$

- Cuando la transmisión se la realiza con P=20mW:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1.4\,W^{-1}Km^{-1})(20x10^{-3}W)} = 33.33Km \qquad \text{(Ec. 2.72)}$$

Los valores obtenidos en las expresiones (Ec. 2.71) y (Ec. 2.72) son menores que los obtenidos en el caso de fibras SSMF ya que los coeficientes no lineales son mayores, haciendo que los efectos no lineales sean tomados en cuenta para cualquier distancia de fibra óptica.

| LONGITUD NO LINEAL EN FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO DSF | | |
|---|---|---|
| | **P=2mW** | **P=20mW** |
| $\boldsymbol{L_{NL}\,(Km)}$ | 333.33 | 33,33 |

***TABLA 2.8 Tabulación de longitudes no lineales en fibras ópticas DSF***

Como se observa en la Tabla 2.8, la longitud no lineal disminuye a medida que la potencia de transmisión es mayor.Una vez determinadas todas las longitudes, se procederá a realizar el análisis de SPM en fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada (DSF).

*2.7.2.2.1 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF de longitud L=30Km*

Al igual que en el caso de las fibras SSMF, se utilizarán las ecuaciones (Ec. 2.12) y (Ec. 2.22) para realizar el cálculo del ensanchamiento producido por SPM. Se utilizarán los valores mencionados en las Tablas 2.7 y 2.8 para realizar el cálculo matemático de SPM en fibras ópticas monomodoDSF.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{333.33Km} = 0{,}033 \quad \text{(Ec. 2.73)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}033)(100x10^{-12})^{-1} = 0.16\pi \cong 0 \quad \text{(Ec. 2.74)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{33.33m} = 0{,}33 \quad \text{(Ec. 2.75)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}33)(100x10^{-12})^{-1} = 1.6\pi \cong 1{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.76)}$$

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{333.33m} = 0{,}033 \quad \text{(Ec. 2.77)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}033)(25x10^{-12})^{-1} = 0.48\pi \cong 0{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.78)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{33.33m} = 0{,}33 \quad \text{(Ec. 2.79)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}33)(25x10^{-12})^{-1} = 4{,}8\pi \cong 5\pi \qquad \text{(Ec. 2.80)}$$

En este caso los efectos de SPM son más críticos que en el caso de las fibras ópticas monomodoSSMF. Esto se debe a que la longitud efectiva es menor, como consecuencia de tener un coeficiente de atenuación mucho mayor que en SSMF.

A continuación se observará el efecto de SPM variando la longitud de la fibra óptica monomodo de dispersión desplazada.

*2.7.2.2.2 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF de longitud L=70Km*

Se realizará el mismo análisis expuesto en la sección (2.7.2.2.1) variando la longitud efectiva de la fibra óptica.

- **Cuando $\boldsymbol{P = 2mW}$ y $\boldsymbol{V_t = 10Gbps}$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{333.33Km} = 0{,}037 \qquad \text{(Ec. 2.81)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}03)(100x10^{-12})^{-1} = 0.18\pi \cong 0 \qquad \text{(Ec. 2.82)}$$

- **Cuando $\boldsymbol{P = 20mW}$ y $\boldsymbol{V_t = 10Gbps}$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{33.33m} = 0{,}37 \qquad \text{(Ec. 2.83)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}37)(100x10^{-12})^{-1} = 1.8\pi \cong 2\pi \qquad \text{(Ec. 2.84)}$$

- **Cuando $\boldsymbol{P = 2mW}$ y $\boldsymbol{V_t = 40Gbps}$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{333.33m} = 0{,}037 \qquad \text{(Ec. 2.85)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}037)(25x10^{-12})^{-1} = 0.57\pi \cong 0.5\pi \quad \text{(Ec. 2.86)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{33.33m} = 0{,}37 \quad \text{(Ec. 2.87)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}37)(25x10^{-12})^{-1} = 5{,}7\pi \cong 5\pi \quad \text{(Ec. 2.88)}$$

Los valores de longitudes no lineales y de dispersión no varían respecto al caso anterior, es decir, cuando se transmite sobre una fibra óptica de L=30Km, ya que la longitud de la fibra no interviene para el cálculo de estos parámetros. Sin embargo el incremento de la longitud efectiva es el parámetro que produce un mayor desfase.

Ahora se verá cómo SPM afecta a los pulsos ópticos cuando se transmiten sobre una fibra óptica monomodo de dispersión desplazada de 200Km.

*2.7.2.2.3 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF de longitud L=200Km*

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{333.33Km} = 0{,}039 \quad \text{(Ec. 2.89)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}039)(100x10^{-12})^{-1} = 0.21\pi \cong 0 \quad \text{(Ec. 2.90)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{33.33m} = 0{,}39 \quad \text{(Ec. 2.91)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}39)(100x10^{-12})^{-1} = 2{,}1\pi \cong 2\pi \quad \text{(Ec. 2.92)}$$

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{333.33m} = 0{,}039 \quad \text{(Ec. 2.93)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}039)(25x10^{-12})^{-1} = 0.61\pi \cong 0.5\pi \quad \text{(Ec. 2.94)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{33.33m} = 0{,}39 \quad \text{(Ec. 2.95)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}39)(25x10^{-12})^{-1} = 6.1\pi \cong 7{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.96)}$$

A continuación se tabula los resultados obtenidos en fibra óptica monomodo DSF:

| **Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF con $V_t = 10Gbps$** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2mW | | | P=20mW | | |
| $L(Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $\varphi_{max}$ | 0,033 | 0,037 | 0,039 | 0,33 | 0,37 | 0,39 |
| $\delta\omega_{max}$ | 0 | 0 | 0 | 1,5$\pi$ | 2$\pi$ | 2$\pi$ |

***TABLA 2.9Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas DSF con Vt=10Gbps***

| **Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo DSF con $V_t = 40Gbps$** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2Mw | | | P=20mW | | |
| $L(Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $\varphi_{max}$ | 0,033 | 0,037 | 0,039 | 0,33 | 0,37 | 0,39 |
| $\delta\omega_{max}$ | 0.5$\pi$ | 0.5$\pi$ | 0.5$\pi$ | 5$\pi$ | 5$\pi$ | 7,5$\pi$ |

***TABLA 2.10Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas DSF con Vt=40Gbps***

| Valores de $\delta\omega_{max}$(sin interpolación) obtenidos en el estudio de SPM en fibras ópticas monomodo DSF | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2mW | | | P=20mW | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $V_T = 10Gbps$ | $0{,}16\pi$ | $0{,}18\pi$ | $0{,}21\pi$ | $1{,}6\pi$ | $1{,}8\pi$ | $2{,}1\pi$ |
| $V_T = 40Gbps$ | $0{,}48\pi$ | $0{,}57\pi$ | $0{,}61\pi$ | $4{,}8\pi$ | $5{,}7\pi$ | $6{,}1\pi$ |

***TABLA 2.11Resultados de $\delta\omega_{max}$reales del estudio de SPM en fibras ópticas monomodo DSF***

Observando los tres escenarios de longitudes de fibra óptica, se puede concluir que el ensanchamiento del espectro no crece de manera lineal cuando se incrementa la longitud de la fibra óptica, por lo contrario crece de una manera logarítmica. Así que se concluye que a mayores longitudes de fibras ópticas, menor será el efecto de SPM.

Si se comparan los resultados obtenidos en el caso de fibras ópticas monomodo SSMF y DSF claramente se observa que SSMF tiene mejor respuesta ante SPM por la siguiente razón:

- Puesto que las fibras ópticas monomodo SSMF tienen mayor área efectiva del campo modal que las fibras ópticas monomodo DSF, lo que ocasiona que el parámetro no lineal tienda a disminuir, obteniéndose como resultado que los efectos de SPM decrezcan.

Finalmente se realizará el mismo análisis expuesto anteriormente utilizando la fibra óptica monomodo de dispersión desplazada (NZ-DSF) para observar la evolución de los pulsos en este medio de transmisión.

### 2.7.3 Análisis de SPM para fibras ópticas monomodode dispersión desplazada no nula (NZ-*DSF*, Non Zero *Dispersion Shifted Fiber*)

El análisis se lo realizará basándose en el siguiente esquema similar al de la Figura 2.7:

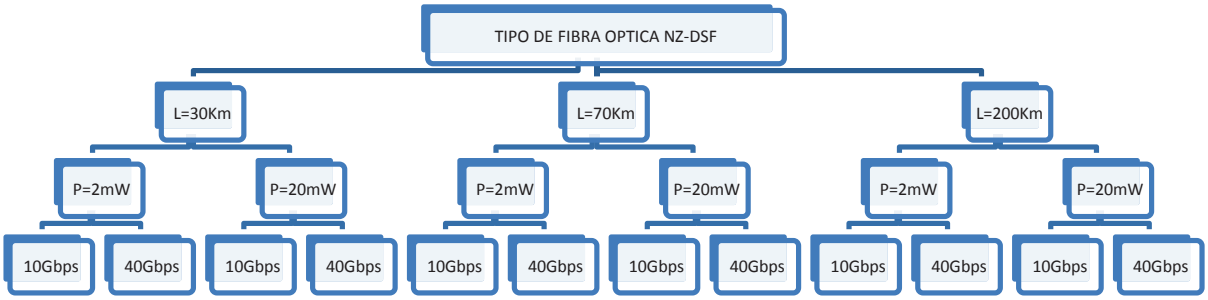



***FIGURA 2.9 Esquema de ejemplos con fibras ópticas monomodo NZ-DSF***

Para poder realizar el análisis, se debe en primer lugar indicar los parámetros de la fibra óptica de dispersión desplazada no nula, para lo cual se utilizará los valores de la Recomendación G.655C:

- La longitud de onda de trabajo en fibras NZ-DSF es 1550nm.
- El coeficiente de atenuación según la Recomendación G.655C es 0.35dB/Km cuando se trabaja en 1550nm.
- Coeficiente de dispersión de segundo orden: $\beta_2 = -20\, ps^2/Km$. [5].
- El índice de refracción no lineal para fibras ópticas NZ-DSF es $2{,}2x10^{-20}\, m^2/W$[5].

La frecuencia central del pulso óptico es la misma que en la fibra óptica DSF, mientras que el valor del área efectiva se la toma del fabricante Corning ($A_{eff} = 72 m^2$), ver Anexo 3. Por lo que el valor del parámetro no lineal es el siguiente:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff}\, C} = \frac{(2{,}2x10^{-20} m^2/W)(378\pi\ THz)}{(7.2x10^{-11} m^2)(3x10^8 m/s)} = 1.3 \frac{1}{KmW} \quad \text{(Ec. 2.97)}$$

A pesar que la longitud de onda es la misma que en fibras ópticas monomodo DSF, el valor del parámetro no lineal el menor, esto se debe a que el área efectiva las fibras ópticas monomodo NZ-DSF son mayores.

Como se observa en las características de la fibra óptica monomodo NZ-DSF, el coeficiente de atenuación es el mismo que para las fibras DSF, por lo que las longitudes efectivas serán las mismas que en el caso anterior.

#### 2.7.3.1 Cálculo de las longitudes de dispersión y no lineales

Como no se ha variado ni la tasa de transmisión ni el coeficiente de dispersión de segundo orden, las longitudes de dispersión serán exactamente las mismas calculadas anteriormente en la sección (2.7.1.2).

Así que a continuación se realizará el cálculo de las longitudes no lineales para cada una de las potencias de transmisión.

- Cuando la transmisión se la realiza con P=2mW:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1.3W^{-1}Km^{-1})(2x10^{-3}W)} = 400Km \quad \text{(Ec. 2.98)}$$

- Cuando la transmisión se la realiza con P=20mW:

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1.25Km^{-1})(20x10^{-3}W)} = 40Km \quad \text{(Ec. 2.99)}$$

En la Tabla 2.12 se indican los valores obtenidos en el cálculo de las longitudes no lineales para la fibra óptica monomodo NZ-DSF:

| LONGITUD NO LINEAL EN FIBRAS ÓPTICAS NZ-DSF | | |
|---|---|---|
| | **P=2mW** | **P=20mW** |
| $L_{NL}\ (Km)$ | 400 | 40 |

***TABLA 2.12 Tabulación de longitudes no lineales en fibras ópticas NZ-DSF***

Una vez calculadas todas las longitudes que intervienen en el cálculo de SPM, se procederá a realizar el análisis de SPM del mismo modo que se realizó para las fibras ópticas monomodo DSF y SSMF.

*2.7.3.1.1 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF de longitud L=30Km*

Para el cálculo se procederá a utilizar los valores obtenidos de las tablas (Tabla 2.3), (Tabla 2.7) y (Tabla 2.12).

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{400Km} = 0{,}028 \qquad \text{(Ec. 2.100)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}028)(100x10^{-12})^{-1} = 0.145\pi \cong 0 \qquad \text{(Ec. 2.101)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{40Km} = 0{,}28 \qquad \text{(Ec. 2.102)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}28)(100x10^{-12})^{-1} = 1{,}45\pi \cong 1{,}5\pi \qquad \text{(Ec. 2.103)}$$

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{400Km} = 0{,}028 \quad \text{(Ec. 2.104)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}028)(25x10^{-12})^{-1} = 0.46\pi \cong 0.45\pi \quad \text{(Ec. 2.105)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{11.31Km}{40Km} = 0{,}28 \quad \text{(Ec. 2.106)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}28)(25x10^{-12})^{-1} = 4{,}6\pi \cong 4{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.107)}$$

*2.7.3.1.2 Análisis de SPM en fibrasópticas monomodo NZ-DSF de longitud L=70Km*

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{400Km} = 0{,}031 \quad \text{(Ec. 2.108)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}031)(100x10^{-12})^{-1} = 0.16\pi \cong 0 \quad \text{(Ec. 2.109)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{40Km} = 0{,}31 \quad \text{(Ec. 2.110)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}31)(100x10^{-12})^{-1} = 1{,}6\pi \cong 1{,}5\pi \quad \text{(Ec. 2.111)}$$

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{400Km} = 0{,}031 \quad \text{(Ec. 2.112)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}031)(25x10^{-12})^{-1} = 0.54\pi \cong 0.5\pi \quad \text{(Ec. 2.113)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.37Km}{40Km} = 0{,}31 \quad \text{(Ec. 2.114)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}31)(25x10^{-12})^{-1} = 5{,}4\pi \cong 5.5\pi \quad \text{(Ec. 2.115)}$$

*2.7.3.1.3 Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF de longitud L=200Km*

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{400Km} = 0{,}032 \quad \text{(Ec. 2.106)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}032)(100x10^{-12})^{-1} = 0.19\pi \cong 0 \quad \text{(Ec. 2.107)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{40Km} = 0{,}32 \quad \text{(Ec. 2.108)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}32)(100x10^{-12})^{-1} = 1{,}9\pi \cong 2\pi \quad \text{(Ec. 2.109)}$$

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{400Km} = 0{,}032 \qquad \text{(Ec. 2.110)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}032)(25x10^{-12})^{-1} = 0.58\pi \cong 0.5\pi \qquad \text{(Ec. 2.111)}$$

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

$$\varphi_{max} = \frac{L_{eff}}{L_{NL}} = \frac{12.42Km}{40Km} = 0{,}32 \qquad \text{(Ec. 2.112)}$$

$$\delta\omega_{max} = 0{,}86(\varphi_{max})(T_0)^{-1} = 0{,}86(0{,}32)(25x10^{-12})^{-1} = 5{,}8\pi \cong 6{,}5\pi \qquad \text{(Ec. 2.113)}$$

Al comparar los resultados obtenidos en los tres tipos de fibras ópticas se observa que la fibra óptica monomodo SSMF es la de mejor respuesta ante los efectos de SPM; esto se debe a que el área efectiva de esta fibra óptica es la mayor. Por lo que una conclusión importante es que mientras mayor sea el área efectiva del campo modal de la fibra óptica, los efectos de SPM serán menores. A continuación se presenta un resumen con los valores obtenidos en el estudio de SPM para fibras ópticas de dispersión desplazada no nula:

| Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF con $V_t = 10Gbps$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2mW | | | P=20mW | | |
| $L(Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $\varphi_{max}$ | 0.028 | 0.031 | 0.032 | 0.28 | 0.31 | 0.32 |
| $\delta\omega_{max}$ | 0 | 0 | 0 | $1{,}5\pi$ | $1{,}5\pi$ | $2\pi$ |

***TABLA 2.13 Resultados teóricos del estudio de SPM en fibras ópticas NZ-DSF con $V_t$=10Gbps***

| Análisis de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF con $V_t = 40Gbps$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2mW | | | P=20mW | | |
| $L(Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $\varphi_{max}$ | 0.028 | 0.031 | 0.032 | 0.28 | 0.31 | 0.32 |
| $\delta\omega_{max}$ | $0.5\pi$ | $0.5\pi$ | $0.5\pi$ | $4.5\pi$ | $5.5\pi$ | $6.5\pi$ |

***TABLA 2.14Resultados teóricos de estudio de SPM en fibras ópticas NZ-DSF con $V_t$=40Gbps***

| Valores de $\delta\omega_{max}$(sin interpolación) obtenidos en el estudio de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P=2mW | | | P=20mW | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $V_T = 10Gbps$ | $0{,}16\pi$ | $0{,}18\pi$ | $0{,}21\pi$ | $1{,}6\pi$ | $1{,}8\pi$ | $2{,}1\pi$ |
| $V_T = 40Gbps$ | $0{,}42\pi$ | $0{,}57\pi$ | $0{,}61\pi$ | $4{,}2\pi$ | $5{,}7\pi$ | $6{,}1\pi$ |

***TABLA 2.15Resultados de $\delta\omega_{max}$reales del estudio de SPM en fibras ópticas monomodo NZ-DSF***

Al analizar los resultados obtenidos en los ejemplos, se concluye que la fibra óptica monomodo SSMF tiene mejor respuesta ante los efectos de la Automodulación de fase, debido a que su coeficiente no lineal es el más bajo de todas las fibras ópticas.

Mientras mayor es el área de la fibra óptica mejor será la respuesta ante los efectos de SPM; y, la fibra óptica monomodo SSMF es la que posee mayor área efectiva del campo modal, ver Anexo 1.

La velocidad de transmisión es otro factor importante al momento de realizar el estudio de SPM, ya que el incremento de ésta provoca un mayor ensanchamiento de los pulsos ópticos. No es lo mismo hablar de una transmisión a 10Gbps que a 40Gbps, puesto que en el segundo caso los efectos de SPM y GVD provocando mayores interferencias.

Como se observa, el estudio no contempla el uso de la fibra multimodo debido a que la potencia en los transmisores para este tipo de fibras está en el orden de los micro-watios; y, como se mencionó anteriormente los efectos de la Automodulación de fase comienzan a tener importancia cuando la potencia de transmisión supera los 10 mW.

En la siguiente tabla se puede apreciar la compilación de los resultados obtenidos en el estudio de la Automodulación de fase en cada una de las fibras ópticas monomodo:

| **RESULTADOS TEÓRICOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE SPM PARA CADA TIPO DE FIBRA ÓPTICA MONOMODO** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Fibra óptica monomodo estándar SSMF** | | | | | |
| | **P=2mW** | | | **P=20mW** | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $V_T = 10Gbps$ | $0{,}11\pi$ | $0{,}14\pi$ | $0{,}15\pi$ | $1{,}1\pi$ | $1{,}4\pi$ | $1{,}5\pi$ |
| $V_T = 40Gbps$ | $0{,}42\pi$ | $0{,}52\pi$ | $0{,}56\pi$ | $4{,}2\pi$ | $5{,}2\pi$ | $5{,}6\pi$ |
| | **Fibra óptica monomodo de dispersión desplazada DSF** | | | | | |
| | **P=2mW** | | | **P=20mW** | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $V_T = 10Gbps$ | $0{,}16\pi$ | $0{,}18\pi$ | $0{,}21\pi$ | $1{,}6\pi$ | $1{,}8\pi$ | $2{,}1\pi$ |
| $V_T = 40Gbps$ | $0{,}48\pi$ | $0{,}57\pi$ | $0{,}61\pi$ | $4{,}8\pi$ | $5{,}7\pi$ | $6{,}1\pi$ |
| | **Fibra óptica monomodo de dispersión desplazada casi nula NZ-DSF** | | | | | |
| | **P=2mW** | | | **P=20mW** | | |
| $L\ (Km)$ | 30Km | 70Km | 200Km | 30Km | 70Km | 200Km |
| $V_T = 10Gbps$ | $0{,}145\pi$ | $0{,}16\pi$ | $0{,}19\pi$ | $1{,}45\pi$ | $1{,}6\pi$ | $1{,}9\pi$ |
| $V_T = 40Gbps$ | $0{,}46\pi$ | $0{,}54\pi$ | $0{,}58\pi$ | $4{,}6\pi$ | $5{,}4\pi$ | $5{,}8\pi$ |

***TABLA 2.16Compilación de resultados obtenidos en el estudio de SPM***

En el siguiente capítulo se realizará la simulación de cada uno de los ejemplos contemplados en este capítulo, para así observar gráficamente cómo el efecto de SPM afecta a los pulsos transmitidos.

# CAPÍTULO 3

## SIMULACIÓN DE LA AUTOMODULACIÓN DE FASE

La importancia del estudio teórico que se realiza sobre algún tópico debe ser complementado con su respectiva simulación para poder visualizar los cambios, los efectos, las consecuencias de utilizar determinados valores en los parámetros y poder prevenir anomalías que afecten o degraden el óptimo desempeño del sistema.

En el caso de la automodulación de fase, además del estudio matemático se debe realizar un análisis gráfico, para así relacionar la parte teórica con la práctica y observar de qué manera afecta o beneficia este efecto, a fin de poder controlar en su mayoría los efectos indeseables que afectan a la transmisión.

Los efectos debido a SPM se los puede controlar si se pone en práctica lo que se estudió en el capítulo anterior, es decir, se deben analizar las longitudes de importancia (longitud de dispersión, longitud no lineal y la longitud efectiva de la fibra óptica), la potencia con la que se transmite la información, el ancho inicial de los pulsos (inverso de la tasa de transmisión), el parámetro no lineal, los coeficientes de dispersión de segundo y tercer orden (GVD y TOD respectivamente).

Para poder realizar la simulación de cualquier sistema, se debe disponer de un software específico que considere los parámetros que están inmersos en el sistema. En este caso el software a utilizarse para la simulación de SPM es el NLSE Solver versión 1.0.

En primer lugar se analizará el funcionamiento del software, es decir, bajo qué principio funciona, posteriormente se detallarán uno a uno los parámetros con sus respectivas unidades.

## 3.1 ANÁLISIS DEL SOFTWARE

Como se mencionó anteriormente el software que se utilizará para la simulación de los efectos que produce SPM sobre una transmisión es el *NLSE Solver versión 1.0.* La razón por la cual se utiliza dicho software en el estudio es porque éste dispone de los parámetros necesarios para describir el comportamiento de SPM y ya que se basa en el análisis de la ecuación no lineal de Schrödinger, dicha ecuación indica la evolución del pulso óptico a medida se transmite a lo largo de la fibra óptica bajo determinados parámetros (potencia óptica, longitudes, coeficiente de atenuación, coeficiente de dispersión), la cual se detalla a continuación [1]:

$$\frac{\partial A(t,z)}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A(t,z)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{2}\frac{\partial^3 A(t,z)}{\partial t^3} - \frac{\alpha}{2}A(t,z) \qquad \text{(Ec. 3.1)}$$
$$+i\gamma\left[|A(t,z)|^2 A(t,z) + \frac{i}{\omega_0}\frac{\partial\left(|A|^2 A\right)}{\partial t} - T_R\frac{\partial\left(|A|^2\right)}{\partial t}A\right]$$

La ecuación no lineal de Schrödinger es utilizada para describir el comportamiento de los pulsos sobre un medio óptico. Como se puede observar en la (Ec. 3.1) la segunda derivada indica el efecto de la dispersión en los pulsos, mientras que los demás términos indican la parte no lineal, que como ya se explicó anteriormente, es debido a que el índice de refracción del núcleo depende de la intensidad con la que se transmiten los pulsos.

Como se puede observar en la (Ec. 3.1) los parámetros que intervienen en la ecuación no lineal de Schrödinger son los mismos parámetros que se estudiaron en el capítulo anterior. Para mayor entendimiento a continuación se procederá a realizar una lista con los parámetros y su significado:

---

[1] Ver anexo 2

- "*alpha (α)*" es el coeficiente de atenuación. Sus unidades son (dB/Km).
- "*gamma (γ)*" es el coeficiente no lineal, su valor lo determina el tipo de fibra que se utiliza en la transmisión. Sus unidades son ($W^{-1}Km^{-1}$)
- "*beta_2* ($\beta_2$)" es el coeficiente de dispersión de segundo orden o conocido comúnmente como coeficiente de GVD (*Group Velocity Dispersion*), el cual indica cómo varía la velocidad del pulso con respecto a la frecuencia y es consecuencia de la dispersión del material del núcleo de la fibra. Sus unidades son ($s^2/m$).
- "*beta_3* ($\beta_3$)" es el coeficiente de dispersión de tercer orden TOD. Parámetro que indica cómo varía la dispersión cuando se trabaja cerca de la longitud de onda de corte, la cual depende de la recomendación de la ITU con la que se trabaje. Sus unidades son ($s^3/m$).
- "$T_R$" es un parámetro utilizado cuando se toma en cuenta la respuesta de Raman. Este parámetro no se lo utiliza en el análisis de SPM.
- "$\omega_0$" es la frecuencia central del pulso donde se encuentra la mayor intensidad óptica. Este parámetro se lo puede calcular con el inverso del ancho inicial del pulso. Sus unidades son (GHz).
- "*A(t,z)"* es la forma del pulso que se va a transmitir. En el caso de este software se cuenta con tres tipos de pulsos: Gaussiano, Secante y Super-Gaussiano (m=3). Para este estudio se realizará un enfoque más profundo sobre los pulsos Gaussianos debido a las facilidades que presentan estos tipos de pulsos.

De esta manera queda claramente explicado cada uno de los términos que están inmersos en la ecuación no lineal de Schrödinger con sus respectivas unidades.

## 3.2 INTERFAZ GRÁFICA DEL SOFTWARE NLSE SOLVER

En esta sección se mostrará la interfaz gráfica que utiliza el software para poder introducir los valores de los parámetros y para seleccionar las opciones adecuadas para la simulación.

El programa consta básicamente de cuatro secciones, la primera se la denomina de parámetros de la fibra determinados por el fabricante, ya que se introducen los valores de atenuación, coeficientes de dispersión y el coeficiente no lineal.

En la segunda sección se introducen los valores propios de la fuente óptica (transmisor óptico), como es el caso de la potencia óptica cuya unidad está dada en watios, la forma de los pulsos a transmitirse (gaussiano, super-gaussiano (m=3) o secante), si se introduce o no un determinado chirp (adimensional) y el ancho inicial de los pulsos (indirectamente se puede saber la tasa de transmisión del sistema utilizado) cuya unidad está dada en segundos.

La tercera sección es para introducir los valores externos de la fibra como por ejemplo la distancia de propagación, la referencia de tiempo que se utiliza para la propagación de los pulsos. Como se observará posteriormente existen dos opciones adicionales en esta sección, pero no se las toma en cuenta debido a que no intervienen en el análisis de SPM.

Y por último la cuarta sección que es donde se seleccionan las gráficas que se desean observar después de haber ingresado los datos en los campos anteriores. Básicamente se dispone de cuatro gráficas:

- *Input/Output Plot:* Muestra la gráfica de la potencia del pulso transmitido y del pulso una vez que llega al receptor.
- *WaterfallPlot:* Muestra una gráfica tridimensional, donde se indica la variación de la intensidad del pulso respecto a la distancia y al tiempo.
- *SurfacePlot:* Esta gráfica indica una representación de intensidad del color del haz de luz durante la propagación.
- *AnimatedPlot:* Esta gráfica muestra la evolución del campo en una forma de película.

Las gráficas mencionadas anteriormente se las puede visualizar en el dominio del tiempo y de la frecuencia, ya que el software permite visualizarlas en ambos dominios. Para este estudio se utilizará solo las gráficas en el dominio de la frecuencia, debido a que se debe analizar el ensanchamiento del espectro de frecuencias sobre las cuales se está transmitiendo la información.

En la siguiente ilustración se puede observar la interfaz gráfica del programa señalando las secciones mencionadas anteriormente:

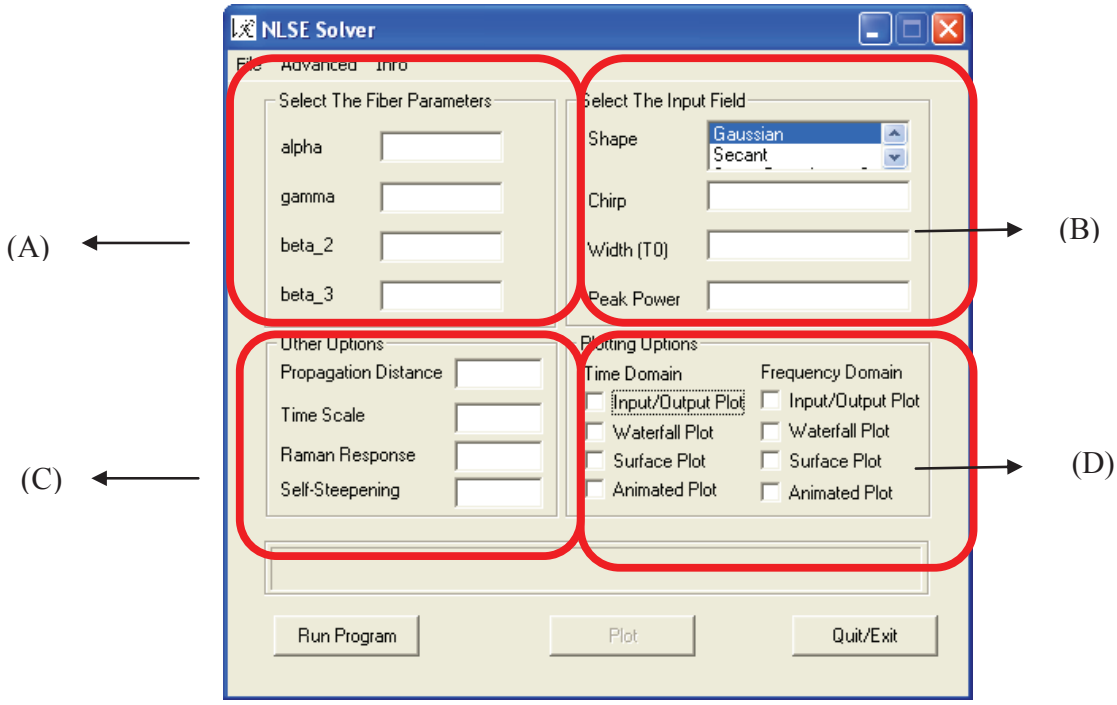



***FIGURA 3.1 Interfaz Gráfica NLSE Solver***

Donde:

(A) Parámetros de la fibra determinados por el fabricante.

(B) Parámetros del transmisor óptico (fuente de luz).

(C) Parámetros adicionales para el cálculo (en el caso de SPM solo se utilizará la distancia de propagación y la escala de tiempo).

(D) Sección donde se elige el tipo de gráfica a ser visualizada. En este estudio se utilizarán las dos primeras opciones (*Input/Output Plot & Waterfall Plot*) en el dominio de la frecuencia, que es donde se analiza la Automodulación de fase.

Como se indica en la Figura 3.1, la interfaz consta de los cuatro campos mencionados anteriormente, pero como se observa existen opciones adicionales en la parte superior de la interfaz las cuales se detallan a continuación:

***FIGURA 3.2 Opciones del programa***

En esta parte del programa se tiene tres opciones, en la opción de "*FILE"* se puede cargar un archivo realizado anteriormente, se puede guardar el presente archivo o simplemente se puede salir del programa. Además se puede guardar los datos introducidos en los campos. Ver Figura 3.3.

***FIGURA 3.3 Opción File del software***

La siguiente opción del programa tiene que ver con los parámetros de las gráficas, es decir, se configura el número de muestras que se desean observar en la gráficas (*Input/Output Plot, Waterfall Plot & Animated Plot*) y los pasos a ser analizados dentro de la distancia "*z"*. Ver Figura 3.4.

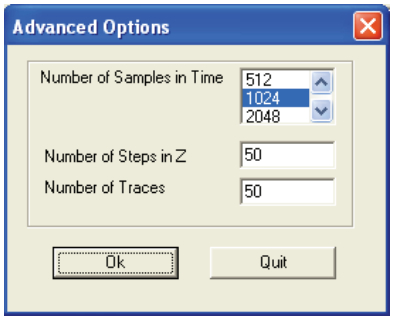



***FIGURA 3.4 Opciones avanzadas***

Y la última pestaña de la parte superior del software es simplemente acerca del programa, y muestra información que ya se había detallado anteriormente. Ver Figura 3.5.

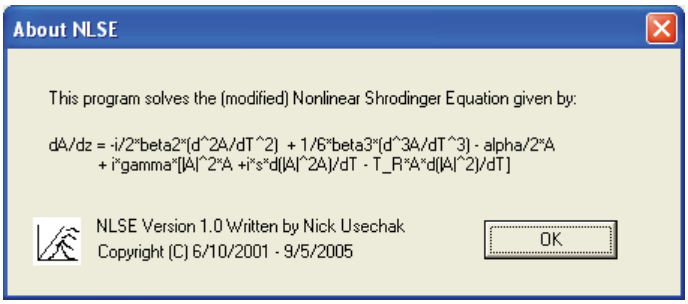



***FIGURA 3.5 Información del programa***

## 3.3 TABULACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS

Una vez explicado el funcionamiento del software de simulación, se realizarán ejemplos prácticos acerca de SPM. En este capítulo se realizarán las simulaciones en el orden en el cual se desarrollaron los ejemplos teóricos, es decir, de la siguiente manera:

1. Utilizando fibra monomodo SSMF
2. Utilizando fibra monomodo DSF
3. Utilizando fibra monomodo NZ-DSF

Los valores calculados en el capítulo 2 serán utilizados para la simulación de cada uno de los ejemplos detallados. Las siguientes tablas resumen los valores de los parámetros necesarios para realizar las simulaciones:

| COEFICIENTE DE ATENUACIÓN ($\boldsymbol{\alpha}$) | | | |
|---|---|---|---|
| | **SSMF** | **DSF** | **NZ-DSF** |
| $\boldsymbol{\alpha}\ (\boldsymbol{dB/Km})$ | 0.2 | 0.35 | 0.35 |

***TABLA 3.1 Coeficientes de atenuación de cada tipo de fibra óptica***

Al igual que en el capítulo 2, los valores mostrados en la Tablas 3.1 son los mencionados en las correspondientes Recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

Así mismo es necesario indicar los valores del coeficiente no lineal en cada una de las fibras ópticas monomodo. La siguiente tabla muestra dichos valores:

| COEFICIENTE NO LINEAL ($\boldsymbol{\gamma}$) | | | |
|---|---|---|---|
| | **SSMF** | **DSF** | **NZ-DSF** |
| $\boldsymbol{\gamma(1/W^{-1}Km^{-1})}$ | 1.21 | 1.4 | 1.3 |

***TABLA 3.2 Coeficientes no lineales de cada fibra óptica***

En la Tabla 3.2 Se observa que el valor más bajo de coeficiente no lineal corresponde a las fibras ópticas monomodo estándar; ésta es la razón por la cual dichas fibras son las que mejor respuesta presentan ante SPM.

En el caso del coeficiente de dispersión de segundo orden éste no cambia, ya que en este análisis no se está tomando en cuenta la variación de la dispersión simplemente la intervención que tiene sobre los pulsos ópticos, y cómo afecta a la transmisión cuando actúa en conjunto con SPM. Y para cada caso el valor del coeficiente de dispersión de segundo orden es de $20\,Km/ps^2$.

El chirp es un factor que en este estudio se lo desprecia, es decir la influencia que tiene sobre los pulsos se la considera nula. Por lo que este parámetro no se lo utilizará en el análisis gráfico.

Los pulsos ópticos super-gaussianos y secantes no serán utilizados en el análisis; como se mencionó en la sección (2.4.1),solo se utilizarán los pulsos gaussianos debido a su facilidad matemática.

Otro parámetro que es necesario para realizar la simulación de SPM es el ancho inicial del pulso óptico ($T_0$). Este parámetro depende exclusivamente de la velocidad de transmisión del sistema y como se observó en el análisis matemático en el capítulo 2, dichas velocidades consideradas fueron 10Gbps y 40Gbps. En la siguiente tabla se observa los anchos de pulso en cada caso.

| ANCHO INICIAL DEL PULSO ($\boldsymbol{T_0}$) | | |
|---|---|---|
| | $\boldsymbol{V_t = 10Gbps}$ | $\boldsymbol{V_t = 40Gbps}$ |
| $\boldsymbol{T_0(ps)}$ | 100 | 25 |

***TABLA 3.3 Ancho inicial de los pulsos ópticos***

Como se observa mientras mayor es la velocidad de transmisión, menor es el ancho de los pulsos ópticos. Por lo que GVD es una limitante en los sistemas que transmiten a altas velocidades, debido a que los pulsos pueden sufrir interferencias.

## 3.4 SIMULACIÓN DE LA AUTOMODULACIÓN DE FASE

Para cada uno de los casos, se utilizarán los valores de las tablas de la sección 3.3, dependiendo del caso al que correspondan. A continuación se realizan las simulaciones:

### 3.4.1 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo estándar (SSMF)

Esta fibra óptica es la que mejor respuesta tiene ante SPM, en esta sección se verificará lo obtenido en la parte teórica. Se realizarán las simulaciones de SPM para las tres longitudes de fibra óptica (30Km, 70Km y 200Km).

En el software NLSE Solver se introducen los valores de los parámetros mostrados en la sección 3.3, es decir, el coeficiente de atenuación($\alpha = 0.2\,dB/Km$), el ancho inicial del pulso($T_0 = 100ps\ o\ T_0 = 25ps$), la potencia óptica($P = 2mW\ o\ P = 20mW$), el coeficiente de dispersión de segundo orden($\beta_2 = 20\,ps^2/Km$), la longitud de la fibra($L = 30Km, L = 70Km\ o\ L = 200Km$) y el coeficiente no lineal($\gamma = 1.21\ 1/(KmW)^{-1}$). Como no se está trabajando cerca de la longitud de dispersión cero, el coeficiente de dispersión de tercer orden es cero($\beta_3 = 0\ ps^3/Km$).

#### 3.4.1.1 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=30Km

Para observar los efectos de SPM sobre los pulsos ópticos es necesario tener una gráfica sobre la cual se pueda realizar una comparación. Es así que a continuación se muestra la gráfica del pulso inicial, es decir, sin alteraciones debido a los efectos lineales y no lineales.

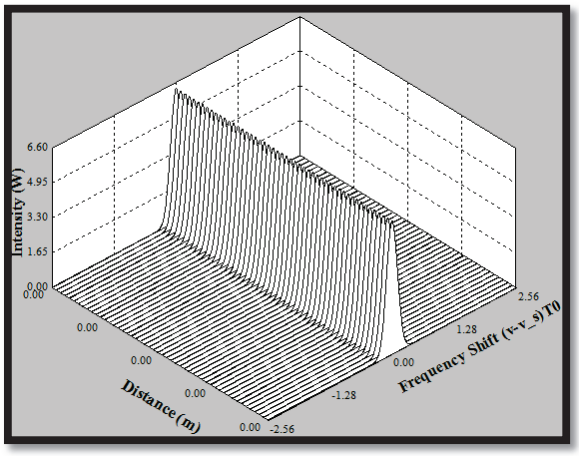



***FIGURA 3.6 Forma inicial del pulso óptico***

Como se puede observar en la Figura 3.6, el pulso óptico no sufre alteraciones al propagarse por el medio físico puesto que se encuentra en su estado inicial (z=0 metros). Además se observa que no existe atenuación puesto que éste no recorre ninguna distancia.

Una vez que se visualizó la forma inicial del pulso, se procederá a realizar el análisis de SPM sobre una fibra óptica monomodo estándar (SSMF) en las tres distancias de longitud de fibra óptica teniendo en cuenta dos velocidades de transmisión diferentes.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

En la siguiente gráfica se introducen los valores de los parámetros de la fibra óptica, de la fuente de luz y del medio guiado (longitud de fibra óptica monomodo) cuando se transmite con una potencia de 2mW y una velocidad de transmisión de 10Gbps:

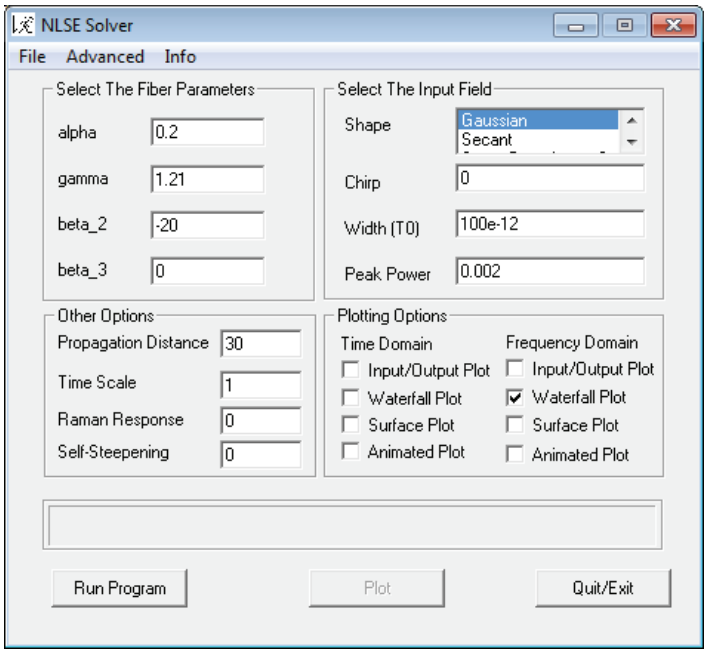



***FIGURA 3.7 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Los resultados obtenidos en la simulación son los siguientes:

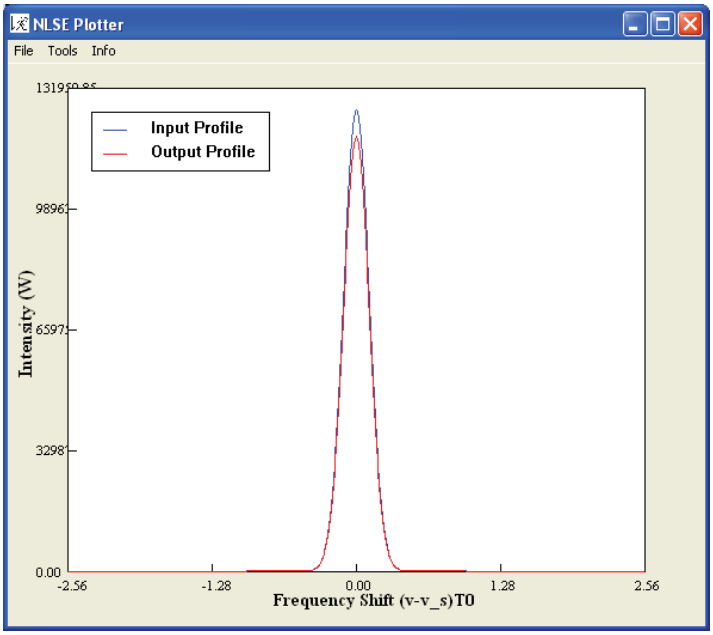



***FIGURA 3.8 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

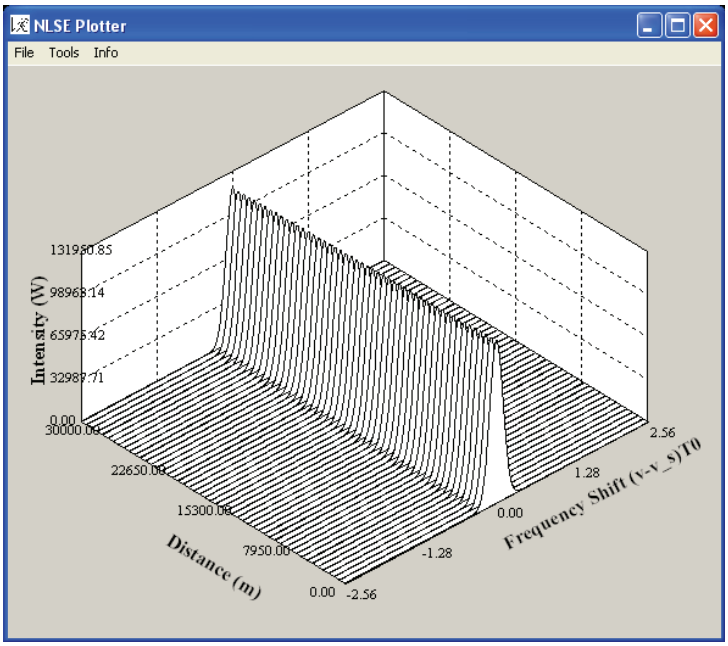



***FIGURA 3.9Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF(L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

En la Figura 3.8 se observa el pulso a los 30Km, se aprecia que éste no sufre ningún efecto de ensanchamiento. La potencia óptica es baja y por eso el único efecto que sufre el pulso es de atenuación. En la Figura 3.9 se aprecia el espectro en tres dimensiones, de esta manera se puede observar la variación de la intensidad óptica respecto a la longitud de la fibra óptica.

Del mismo modo se realiza la simulación cuando la potencia de transmisión es 20mW. Se espera que la automodulación de fase afecte a la transmisión según lo obtenido en la sección 2 del capítulo anterior.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

En este caso la potencia se incrementó, por ende el coeficiente no lineal; por tal razón los efectos de SPM tendrán influencia en el espectro de frecuencias. A continuación se muestran los resultados obtenidos de la simulación:

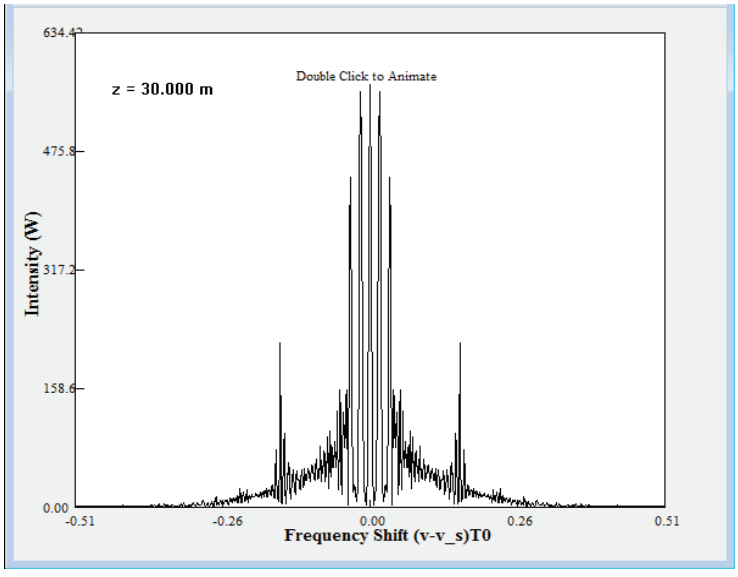



***FIGURA 3.10Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF(L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

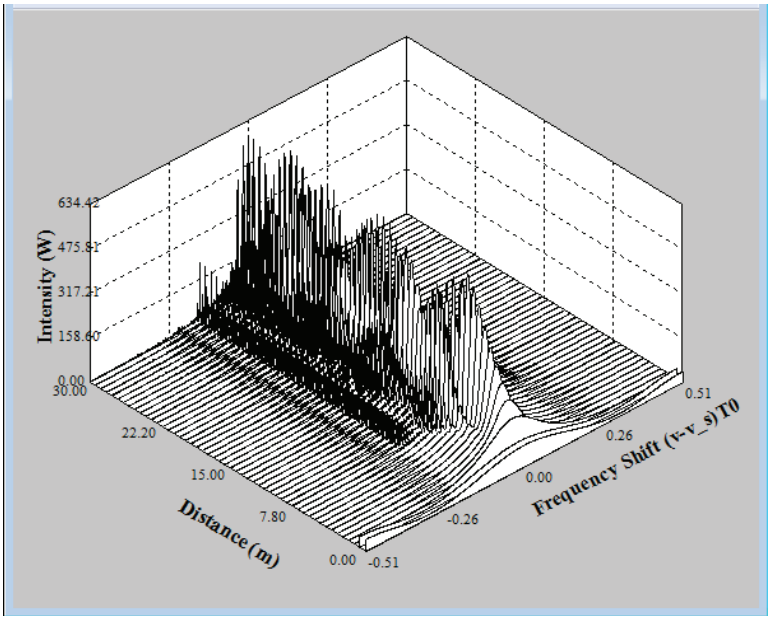



***FIGURA 3.11 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF(L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

A diferencia del caso anterior en el cual se transmite con una potencia de 2mW, se observa que el espectrose ensancha sobre la frecuencia central del pulso, por lo que si existen más canales transmitidos, éstos sufrirán interferencias.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

En el primer ejemplo se observó que ni SPM ni GVD ensancharon el espectro de frecuencias, en este caso se observará dicho ensanchamiento una vez que se incrementa la velocidad de transmisión. El valor que varía respecto de los dos casos anteriores es el ancho inicial del pulso.

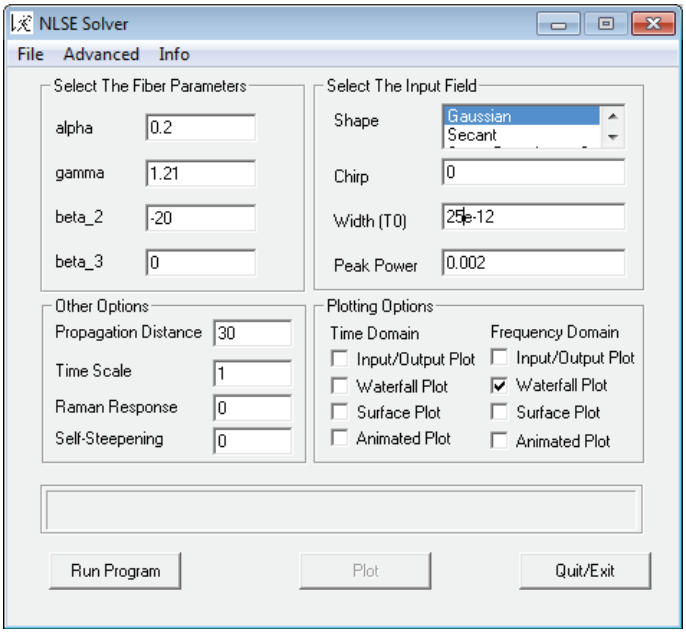



***FIGURA 3.12 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

Los resultados obtenidos en la simulación son los siguientes:

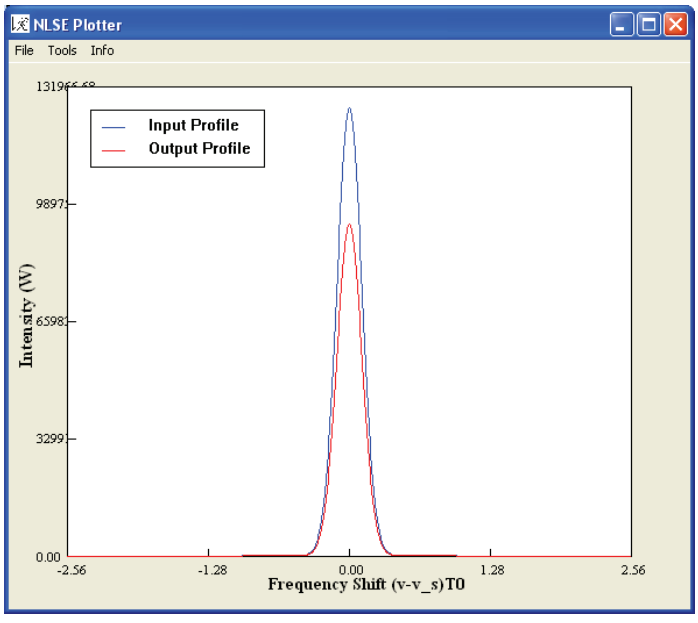



***FIGURA 3.13Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

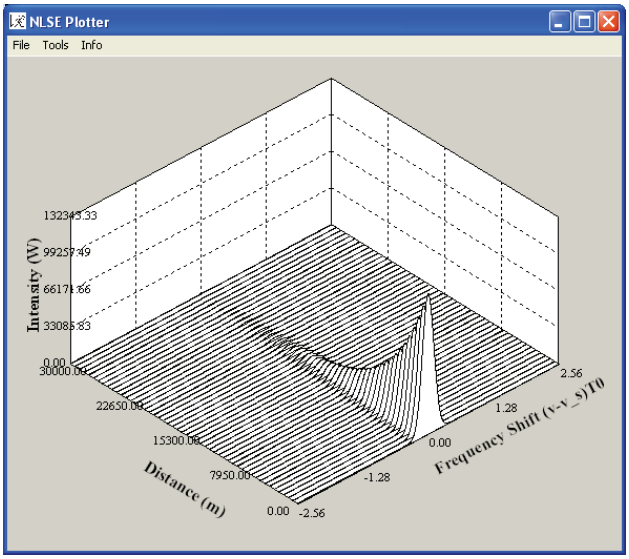



***FIGURA 3.14 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

Comparando la Figura 3.13y 3.14 con las gráficas de las Figura 3.8 y 3.9 se observa que no existe ensanchamiento del espectro provocado ni por SPM ni por GVD, esto se debe a que la potencia de transmisión no es alta.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

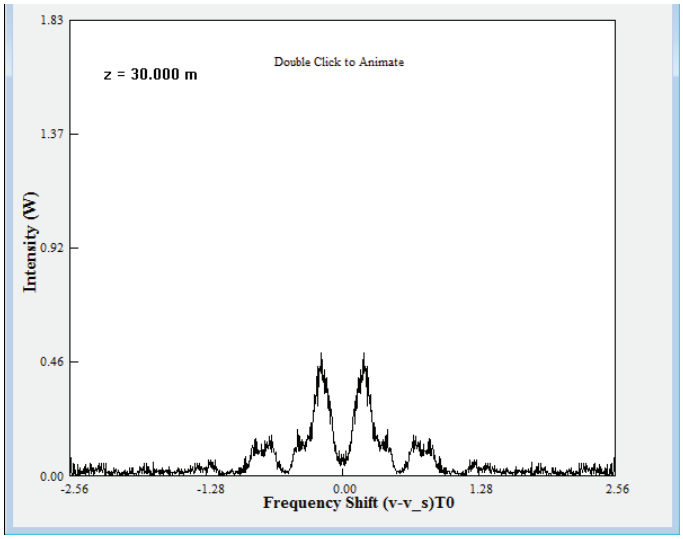



***FIGURA 3.15Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

Como se observa en la Figura 3.15y 3.16, los efectos de GVD y SPM juntos provocan un ensanchamiento excesivo del espectro y como consecuencia un solapamiento en los canales de frecuencia, generando errores en la transmisión.

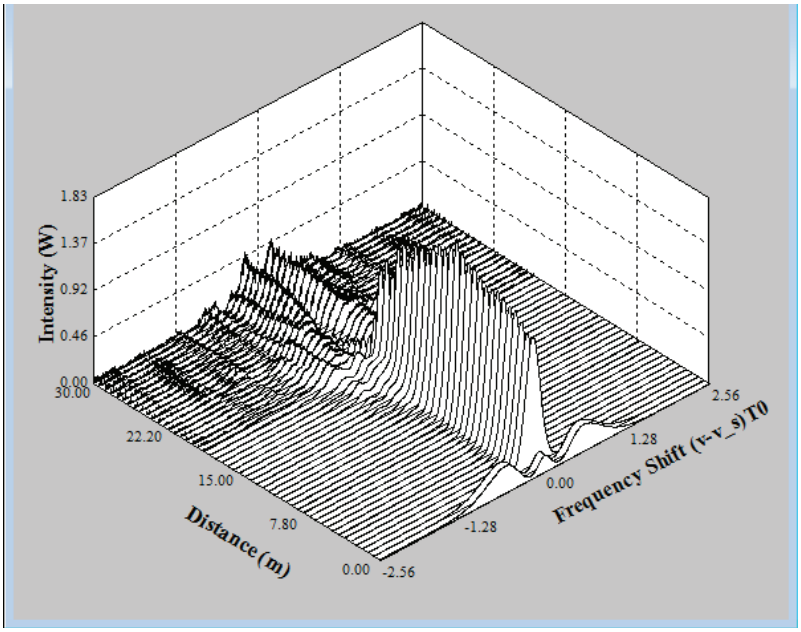



***FIGURA 3.16Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

Como se pudo observar, tanto en las simulaciones como en el análisis matemático los resultados fueron similares, es decir, se contrastó la parte matemática con la gráfica.

Las simulaciones presentadas correspondieron a un mismo tipo de fibra (SSMF) con una longitud que no ha variado. A continuación se realizarán las mismas simulaciones para la fibra óptica monomodo estándar (SSMF) pero esta vez incrementando su longitud.

### 3.4.1.2 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=70Km

En esta sección se realizará de igual manera las simulaciones de SPM pero ahora con una longitud de fibra óptica mayor. Se tratará de observar si mejora o empeora el espectro de frecuencias.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

Los datos introducidos en el software de simulación son los siguientes:

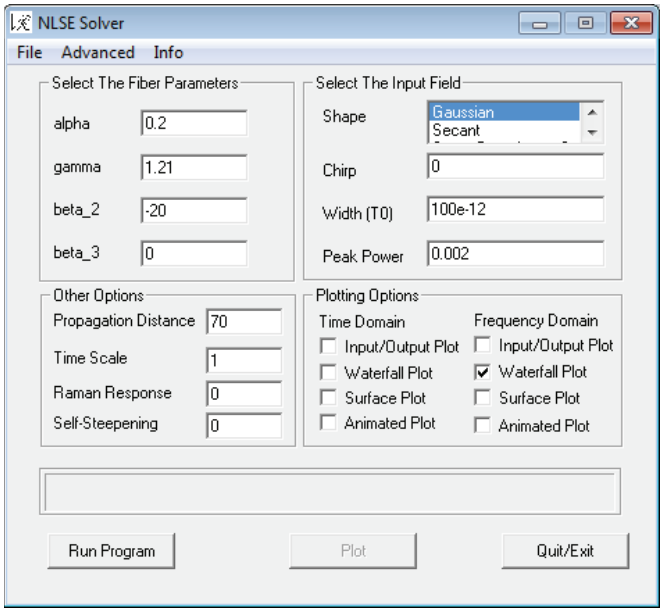



***FIGURA 3.17 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Una vez introducidos los datos en el software computacional a continuación se observarán los resultados gráficos obtenidos. Estos resultados servirán para relacionarlos con la parte matemática del capítulo 2.

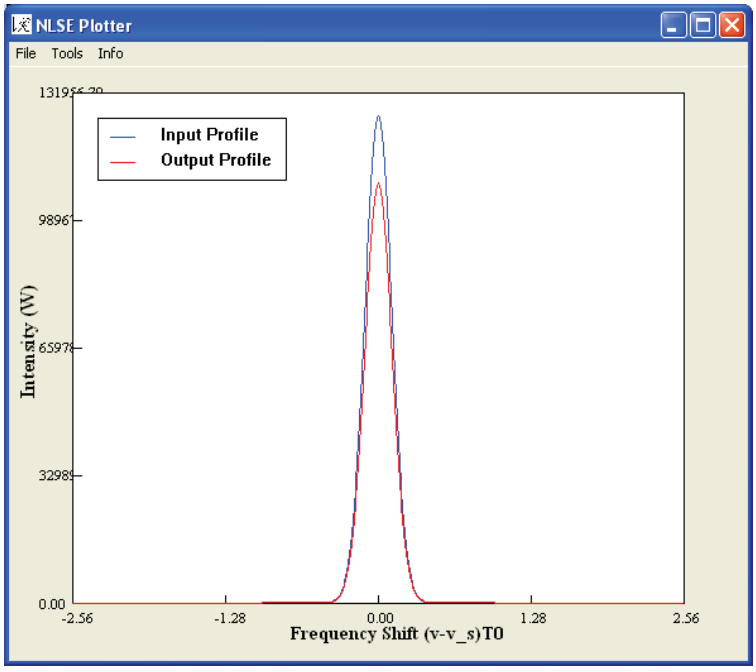



***FIGURA 3.18Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

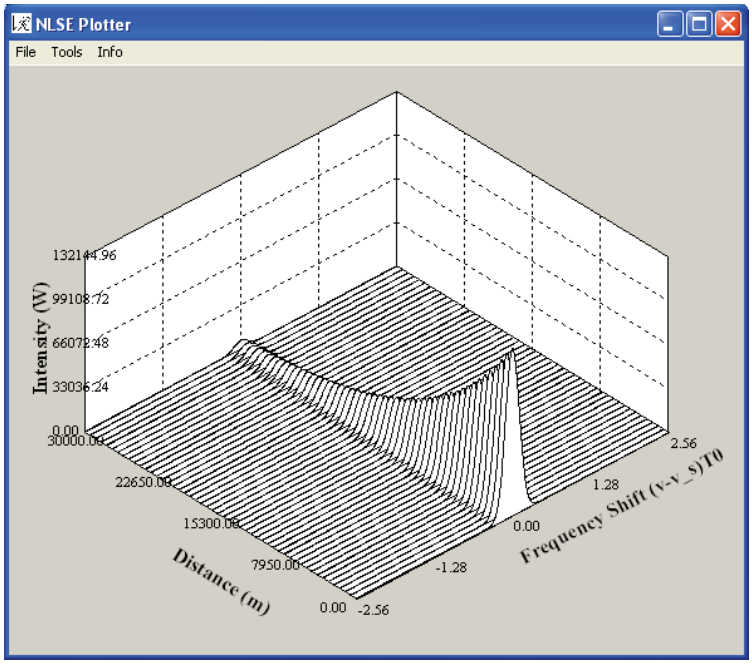



***FIGURA 3.19Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Al igual que en la simulación de SPM en una fibra óptica de L=30Km, para una longitud de 70Km no se observa un ensanchamiento del espectro cuando se transmite con estos valores de los parámetros.

En la Figura 3.19 se observa que no existen ensanchamientos del espectro en el trayecto de la fibra, mientras que en la Figura 3.18se observa que el pulso mantiene su forma bajo los efectos de la atenuación producida por el trayecto recorrido.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

En este caso se observa que los efectos no lineales tienen impacto en la transmisión debido al incremento de la potencia óptica.

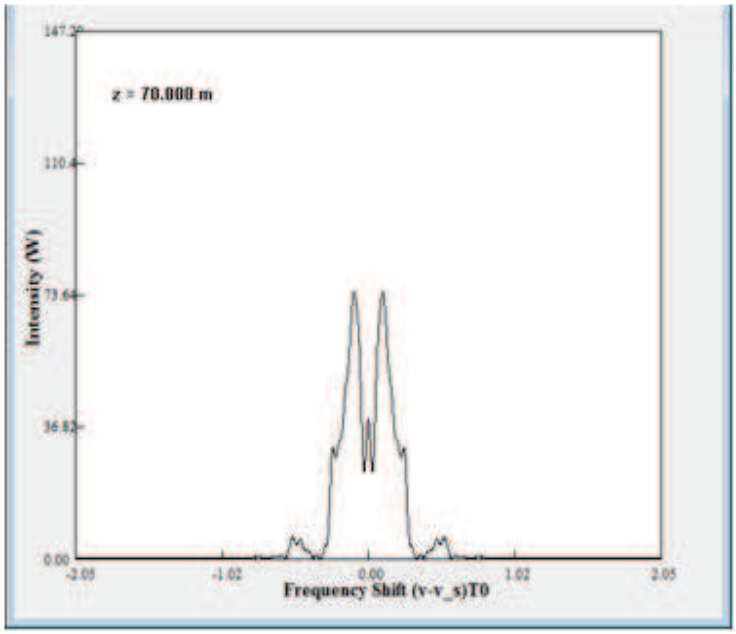



***FIGURA 3.20Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

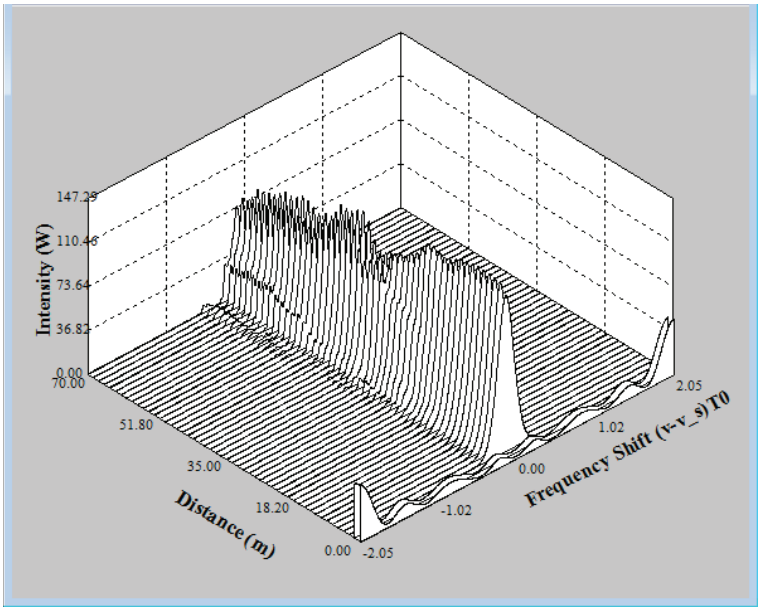



***FIGURA 3.21Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

Una vez incrementada la potencia, se observa el ensanchamiento del espectro sobre la frecuencia central del pulso. En la Figura 3.20 se observa la generación de nuevos picos de frecuencia, mientras que en Figura 3.21 se observa el ensanchamiento del espectro.

Se puede notar que a diferencia de la transmisión sobre una fibra de L=30Km, el ensanchamiento es un poco más pronunciado debido a que si L aumenta, incrementa la longitud efectiva, lo que a su vez produce que se incremente el cambio de fase de la señal transmitida. Por lo que mientras mayor es la longitud de la fibra mayor serán los efectos de SPM.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

Ahora se observará cómo GVD afecta la transmisión sobre una fibra de mayor longitud. El parámetro que varía respecto a los dos casos anteriores es el ancho inicial del pulso.

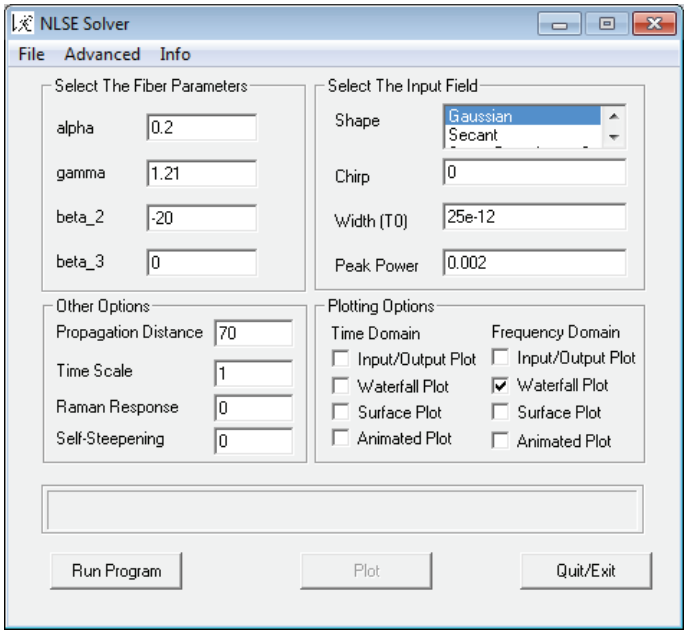



***FIGURA 3.22 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

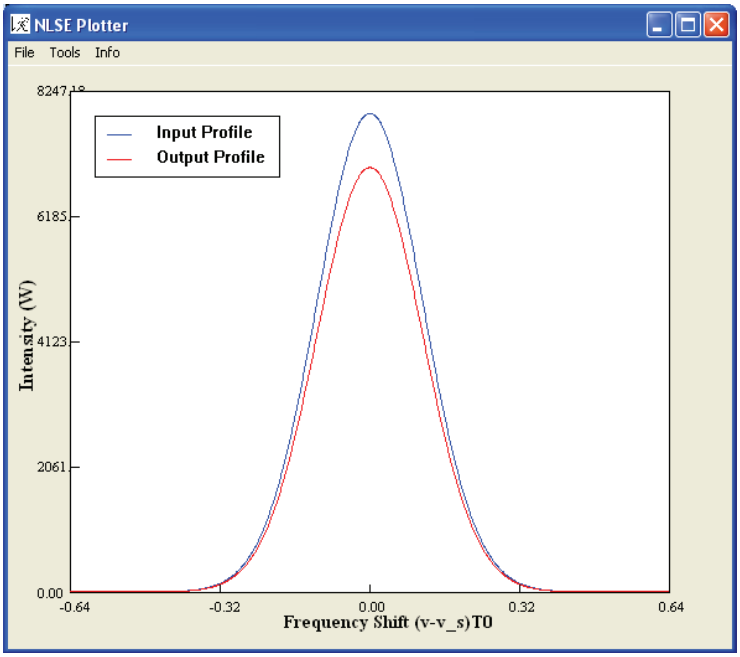



***FIGURA 3.23Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

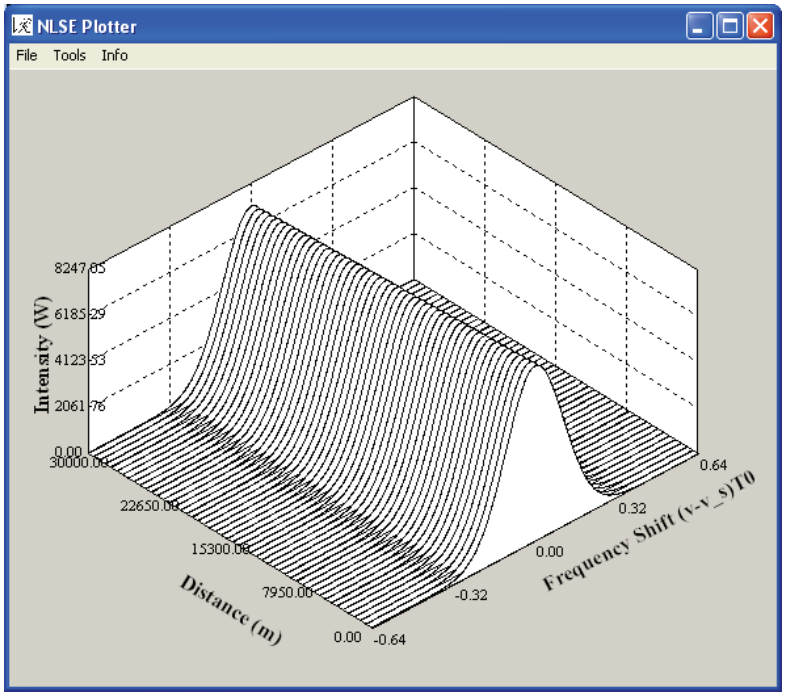



***FIGURA 3.24Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

Se observa en la Figura 3.23 y Figura 3.24 que no existe incremento en el espectro puesto que la potencia de transmisión es baja.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

Ahora se observará cómo el espectro se degrada debido a los efectos de SPM y GVD juntos. Dado que se incrementa la tasa de transmisión se incrementan los efectos de SPM y los efectos por parte de GVD.

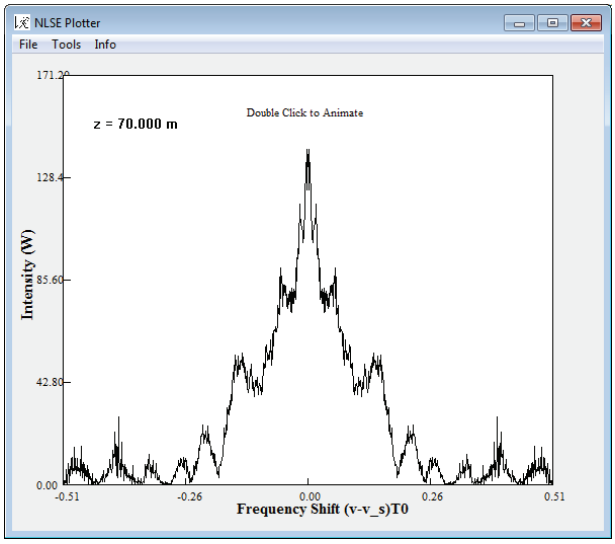



***FIGURA 3.25 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

En ambas figuras se nota que existiría una interferencia con los canales adyacentes transmitidos. Este caso es importante tomarlo en cuenta cuando se utiliza la técnica de transmisión DWDM (*Dense Wavelenght DivisionMultiplexing*) ya que la separación entre canales de frecuencia es relativamente pequeña.

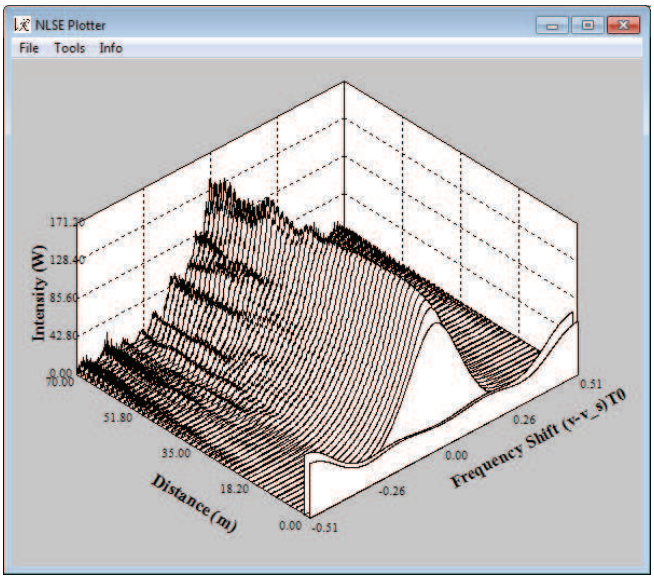



***FIGURA 3.26Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

### 3.4.1.3 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo SSMF de longitud L=200Km

Esta vez se incrementa aún más la longitud de la fibra para observar cómo SPM y GVD ensanchan el espectro de frecuencias.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

En este caso al igual que en los dos casos anteriores de longitudes de fibra óptica, se utilizan los mismos parámetros previamente establecidos, es decir, el coeficiente de atenuación $(\alpha = 0.2dB/Km)$, el coeficiente no lineal $(\gamma = 1.21\ 1/(KmW))$, el coeficiente de dispersión de segundo orden $(\beta_2 = -20\ ps^2/Km)$.

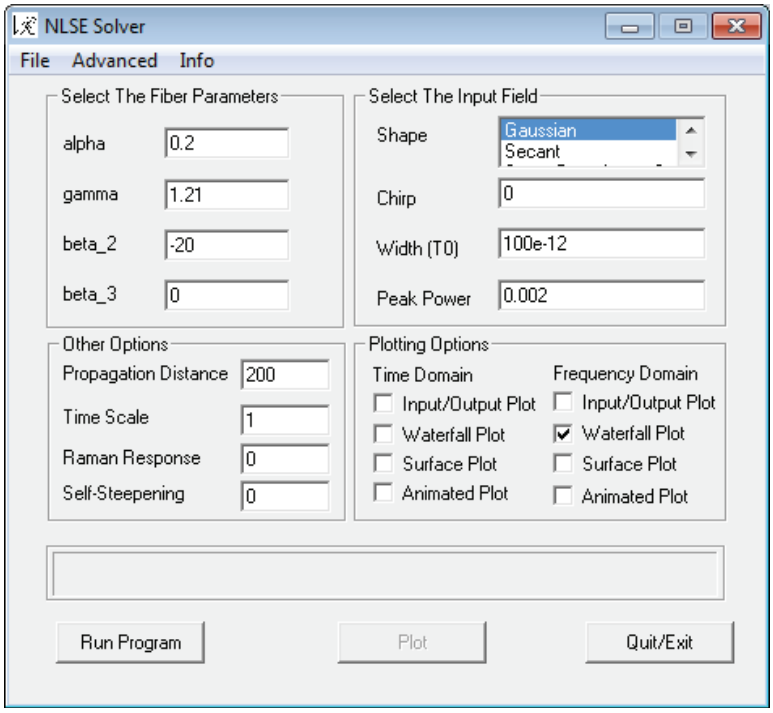



***FIGURA 3.27Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

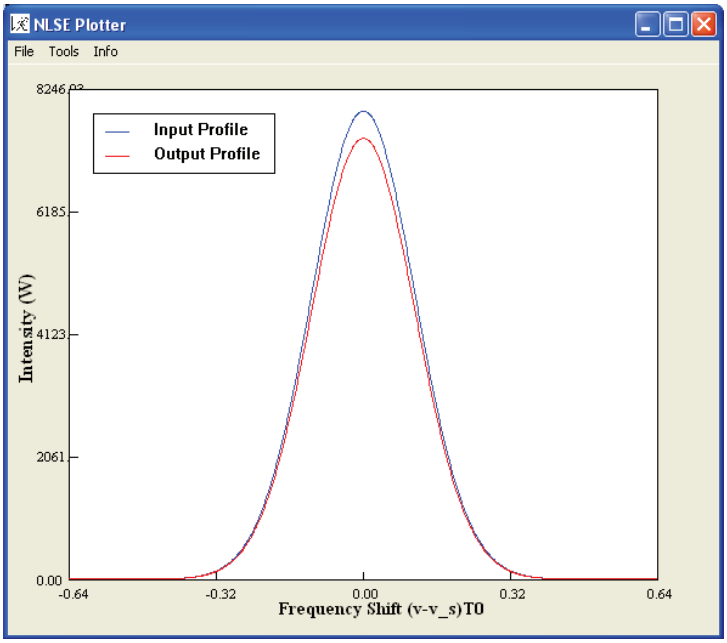



***FIGURA 3.28Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

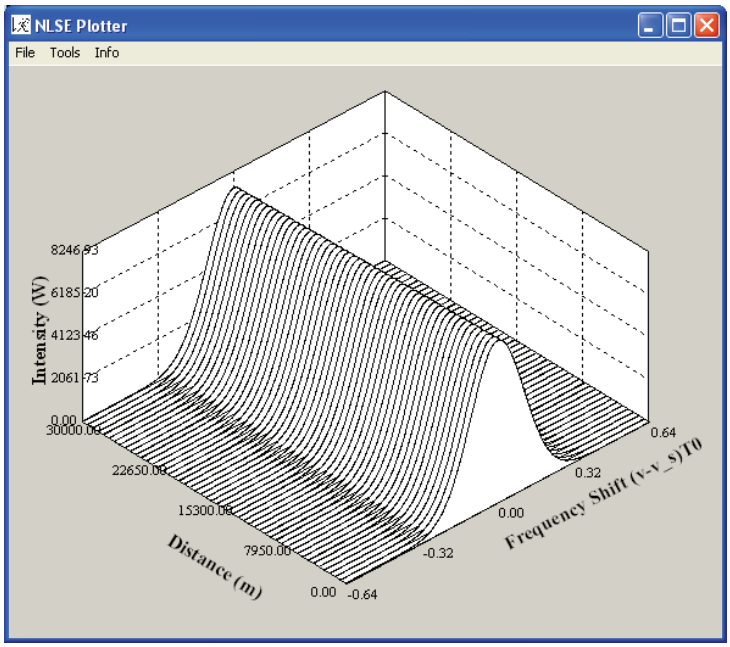



***FIGURA 3.29Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Al igual que en los dos casos anteriores (L=30Km y L=70Km) no existe problema de ensanchamiento por parte de SPM, esto se debe a que la potencia es baja y no presenta ninguna modulación de fase la señal.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

Ahora se observará cómo SPM influye a la degradación del espectro de frecuencias una vez que se incrementa la potencia de transmisión.

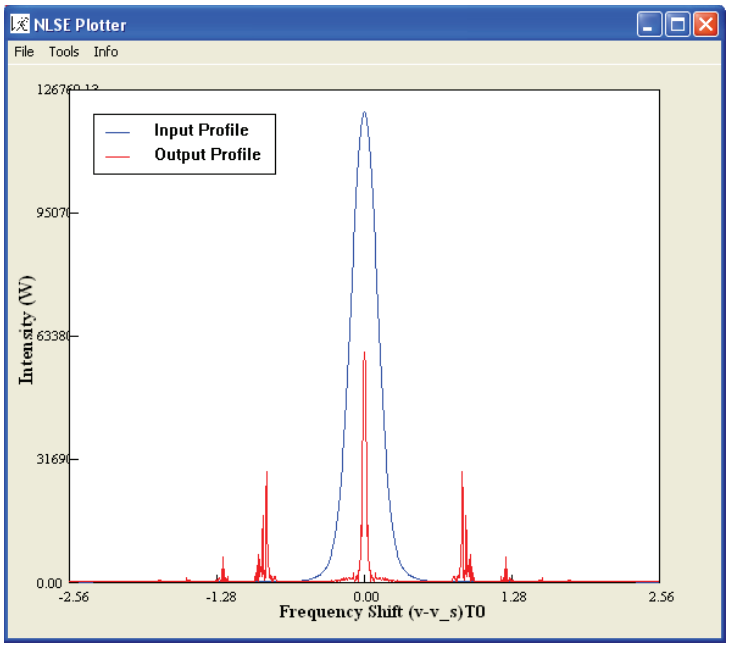



***FIGURA 3.30 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

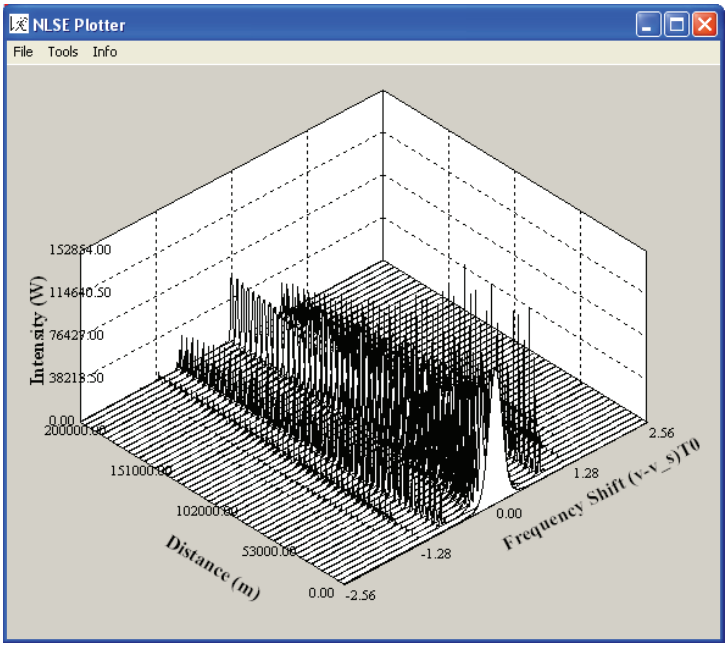



***FIGURA 3.31 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

En las gráficas de la Figura 3.30 y 3.31 se indica una degradación del espectro, produciendo que se solapen el canal de frecuencia transmitido con los otros canales adyacentes, es decir, se sobreponen las señales transmitidas produciendo interferencia. Este escenario degrada la transmisión en sistemas WDM ya que los canales tienen una separación pequeña.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

Ahora se observará cómo el incremento de la velocidad de transmisión con dicha longitud de fibra óptica afecta al espectro de frecuencias.

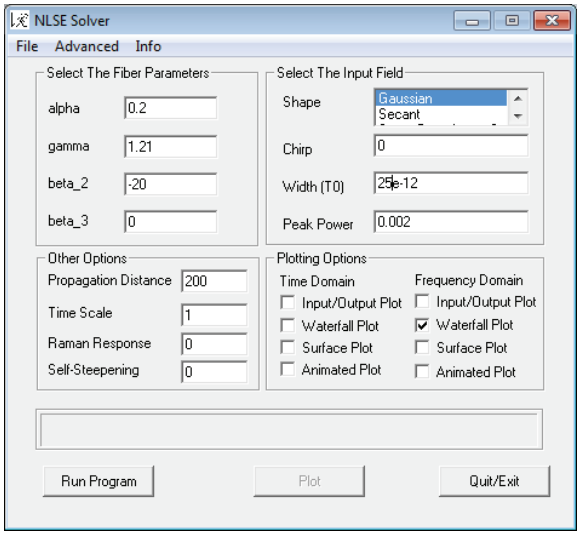



***FIGURA 3.32Introducción de datos para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mw y $T_0$=25ps)***

Los resultados obtenidos en la simulación de la Automodulación de fase cuando se transmite bajo los parámetros indicados en la Figura 3.32 son los que se indican a continuación:

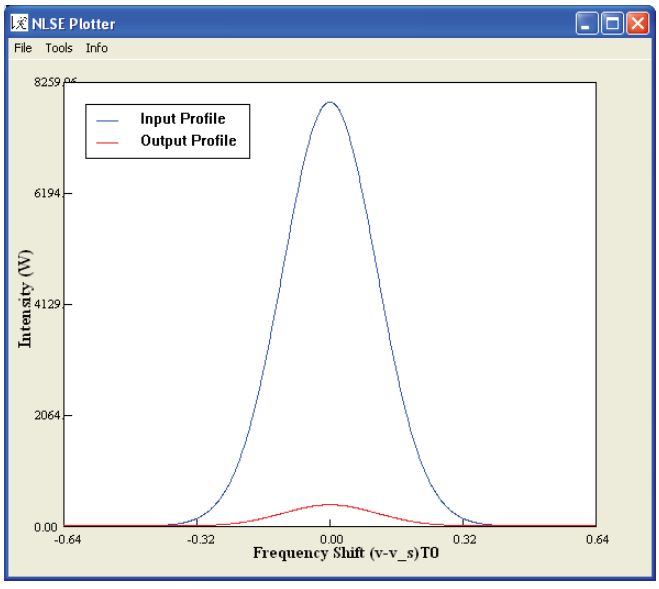



***FIGURA 3.33Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

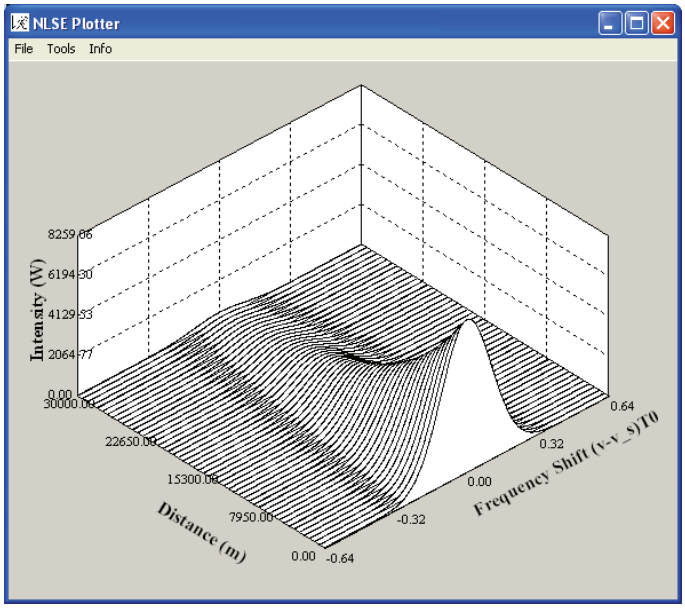



***FIGURA 3.34 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

Este es el peor escenario de todos los mostrados anteriormente debido a que la longitud de la fibra es mayor, la potencia de transmisión es alta y se transmiten pulsos de un ancho temporal menor (lo que incrementa el ancho de banda).

Como se observa a continuación en ambas gráficas (Figura 3.35 y 3.36), dicha transmisión no se factible debido a que ningún canal enviaría los datos correctos, es decir, se incrementaría la tasa de errores.

Las gráficas que se obtuvieron de las simulaciones con el software son las siguientes:

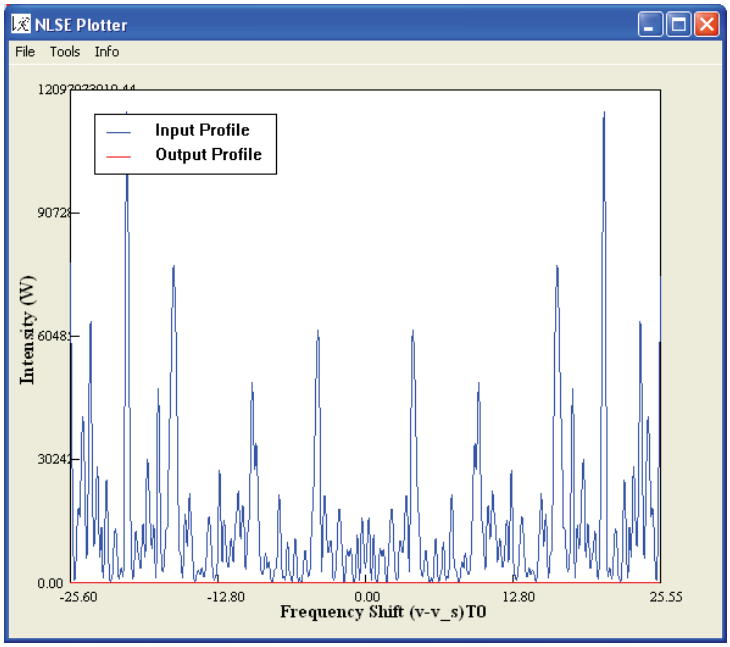



***FIGURA 3.35Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

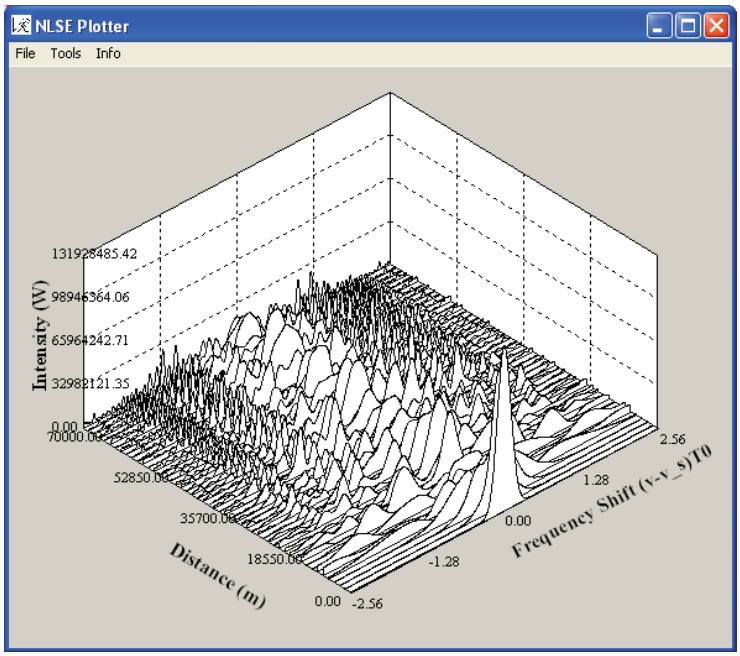



***FIGURA 3.36Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo SSMF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

### 3.4.2 Simulación de SPM en fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada (DSF)

Para realizar las simulaciones de SPM en fibras ópticas monomodo DSF, se debe tener en cuenta que el valor del parámetro no lineal es diferente debido al diámetro del núcleo de la fibra, como este parámetro geométrico es menor, el coeficiente es mayor.

El coeficiente de atenuación es otro parámetro que difiere del análisis anterior, se observará cómo dicho factor afecta en la simulación de SPM.

#### 3.4.2.1 Simulación de SPM en fibras DSF de longitud L=30Km

Al igual que en la sección anterior, se introducirán en el software NLSE Solver los valores de los parámetros obtenidos en el capítulo 2.

En el software NLSE Solver se introducen los valores mostrados en la sección 3.3, es decir:

- El coeficiente de atenuación ($\alpha = 0.35\, dB/Km$)
- El ancho inicial del pulso ($T_0 = 100ps\ o\ T_0 = 25ps$)
- La potencia óptica ($P = 2mW\ o\ P = 20mW$)
- El coeficiente de dispersión de segundo orden ($\beta_2 = -20\, ps^2/Km$)
- La longitud de la fibra ($L = 30Km, L = 70Km\ o\ L = 200Km$)
- El coeficiente no lineal ($\gamma = 1.4\ \ 1/(KmW)^{-1}$).

Como no se está trabajando cerca de la longitud de dispersión cero, el coeficiente de dispersión de tercer orden es cero ($\beta_3 = 0\ \ ps^3/Km$).

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

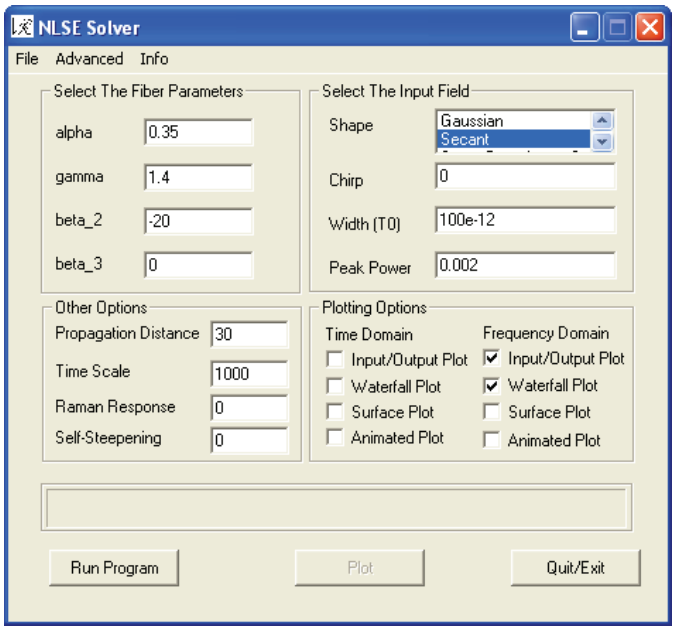



***FIGURA 3.37 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones:

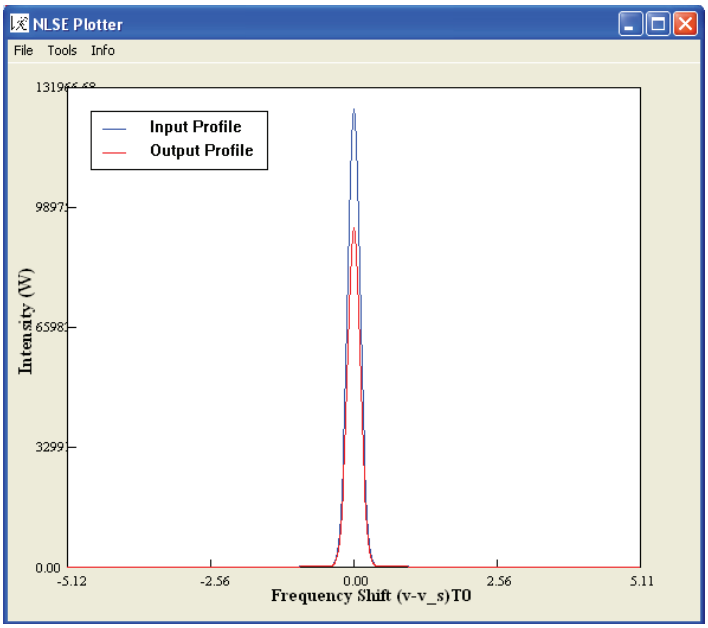



***FIGURA 3.38 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF(L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

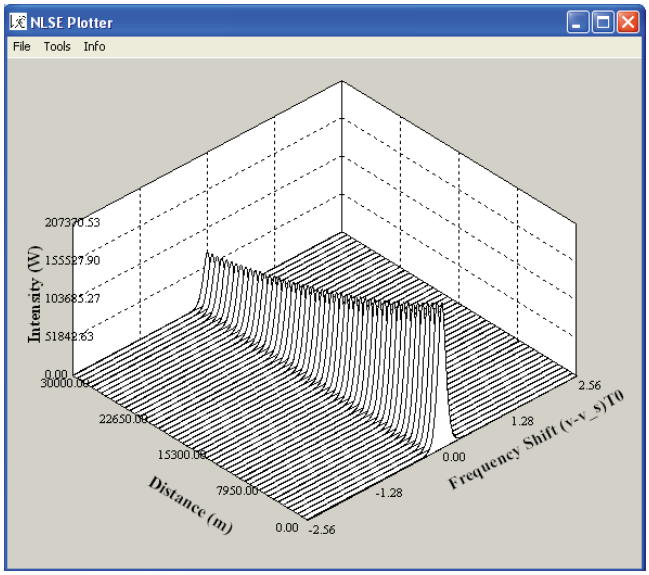



***FIGURA 3.39Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF(L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Como se observa en la Figura 3.38 y Figura 3.39, el pulso óptico se ve afectado solo por el coeficiente de atenuación. El espectro no se ensancha ya que la potencia óptica de transmisión es 2mW, por lo que no existen efectos no lineales.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

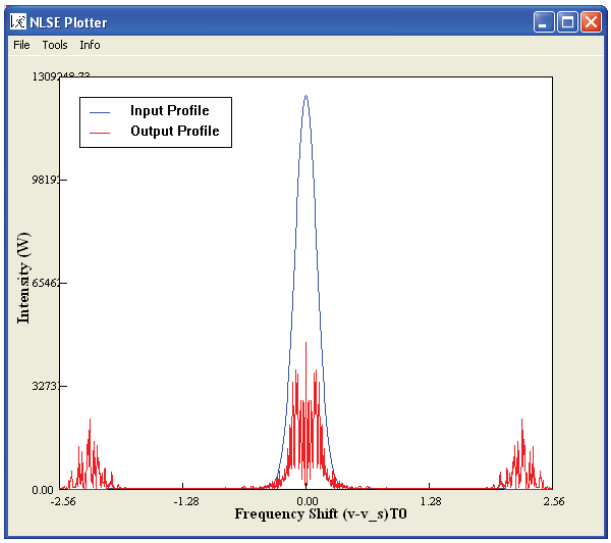



***FIGURA 3.40 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF(L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

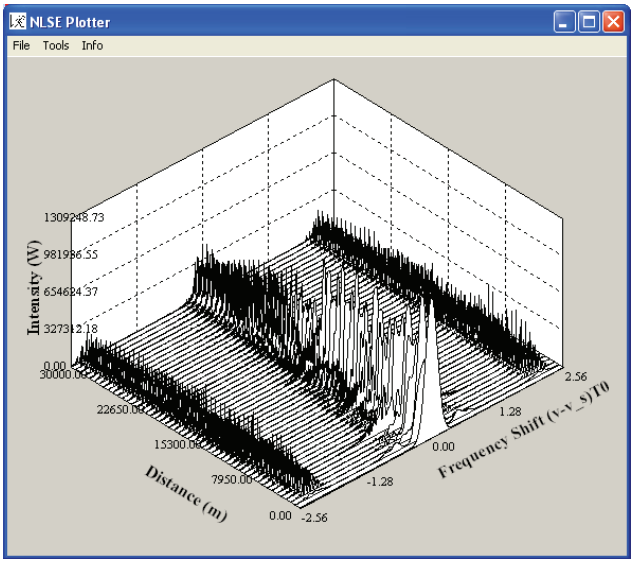



***FIGURA 3.41 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF(L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

En este caso (Figura 3.40 y 3.41) se observa que los efectos no lineales empiezan a tener importancia debido al incremento de la potencia óptica emitida por la fuente de luz. A continuación se realizará el análisis cuando se transmite con $V_T = 40Gbps$.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

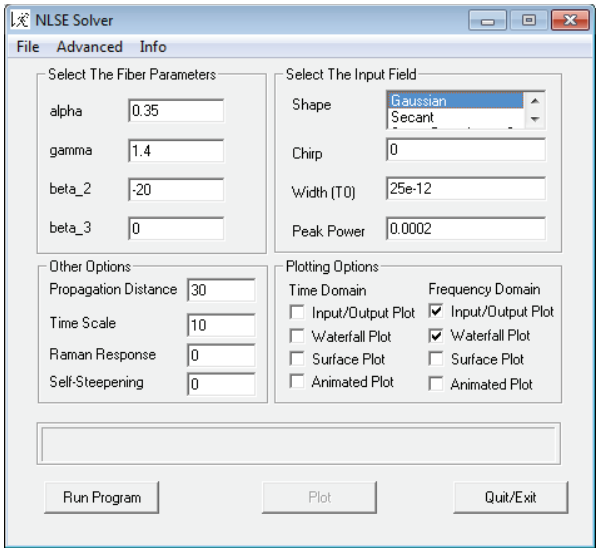



***FIGURA 3.42 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

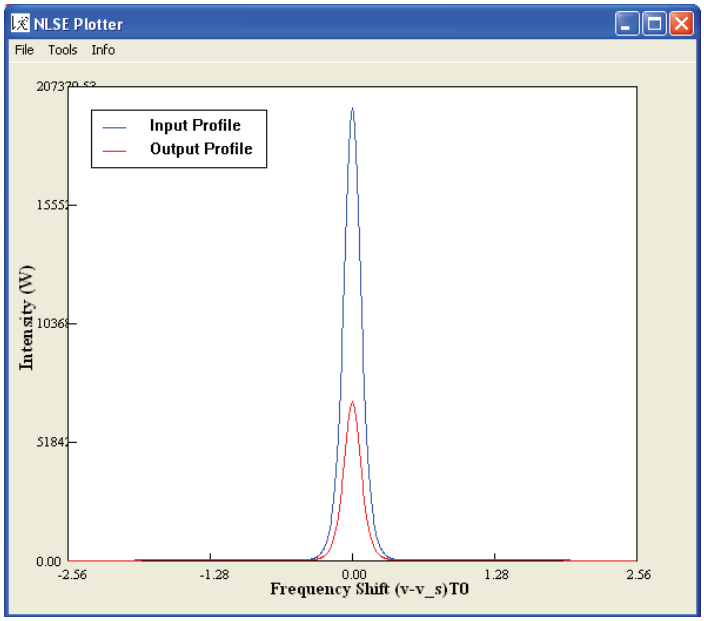



***FIGURA 3.43Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

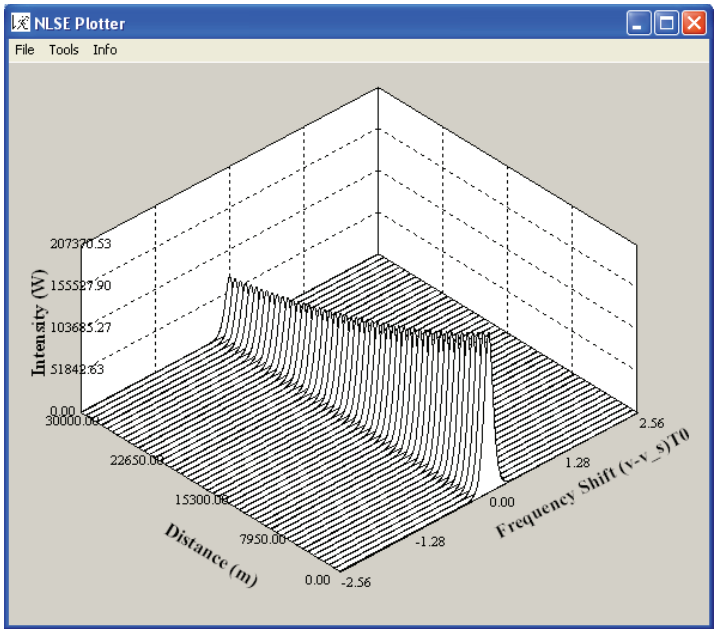



***FIGURA 3.44Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

En la Figura 3.43 y 3.44 se observa un ensanchamiento espectral debido a GVD, ya que mientras mayor es la velocidad de transmisión, el ancho de banda se incrementa. SPM no aporta en el ensanchamiento espectral ya que su potencia es baja.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

En este caso se observará cómo SPM y GVD contribuyen al ensanchamiento del espectro de frecuencias. Esto se debe a que la tasa de transmisión es muy alta, lo que produce que el ancho de banda se incremente; y, la potencia con la que se transmiten los pulsos también tiene un valor alto.

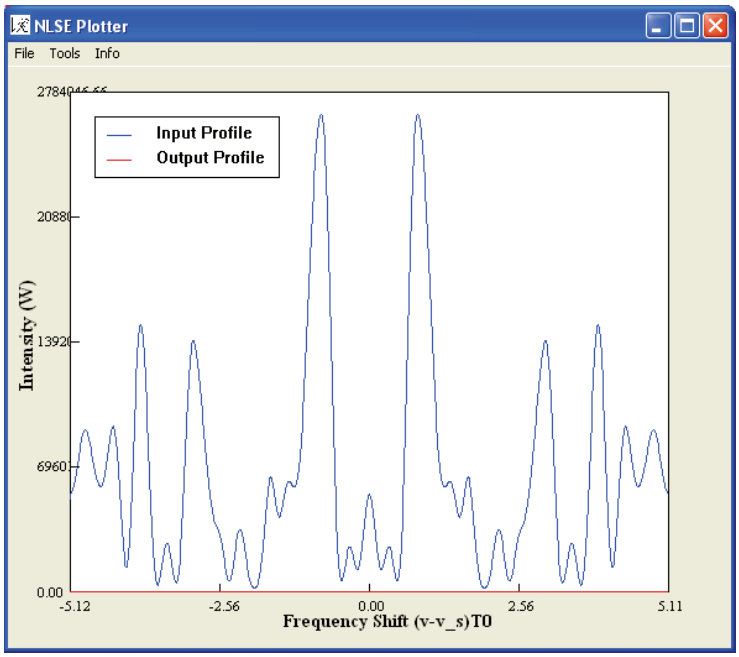



***FIGURA 3.45Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

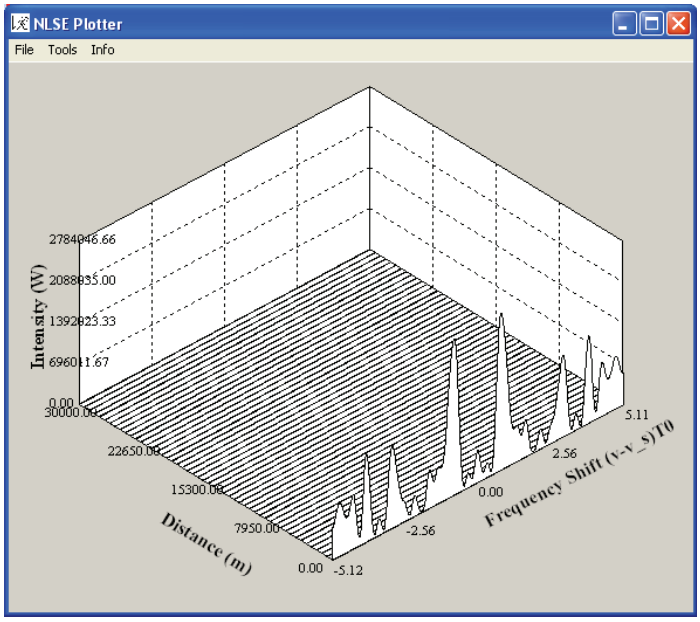



***FIGURA 3.46Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

### 3.4.2.2 Simulación de SPM en fibrasópticas monomodo DSF de longitud L=70Km

En este caso se realizarán simulaciones similares a las presentadas en la sección 3.4.2.1, pero en esta ocasión con una longitud de fibra óptica mayor.

En el caso de fibras ópticas monomodo SSMF se observó que mientras mayor es la longitud de la fibra óptica, mayor será el aporte de GVD y SPM para el ensanchamiento del espectro, esto se debe al incremento de la longitud efectiva de la fibra óptica.

Para este nuevo análisis gráfico, los valores del coeficiente de atenuación y del parámetro no lineal no varíandebido a que solo se realizó un incremento en la longitud de la fibra, más no en el tipo de fibra.

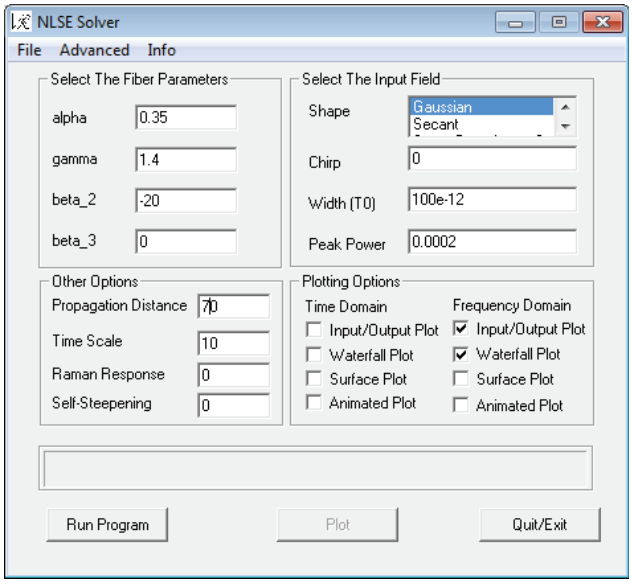



***FIGURA 3.47 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km y P=2mW, $T_0$=100ps)***

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

Al igual que en el caso de L=30Km, para este caso se observa una disminución en la potencia de los pulsos transmitidos.

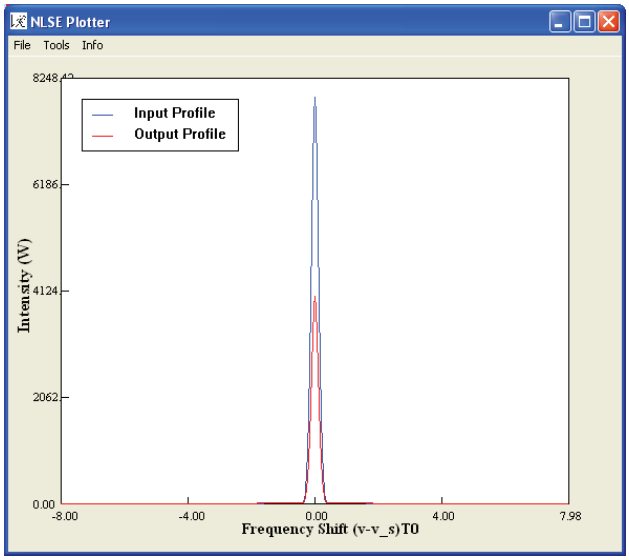



***FIGURA 3.48Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

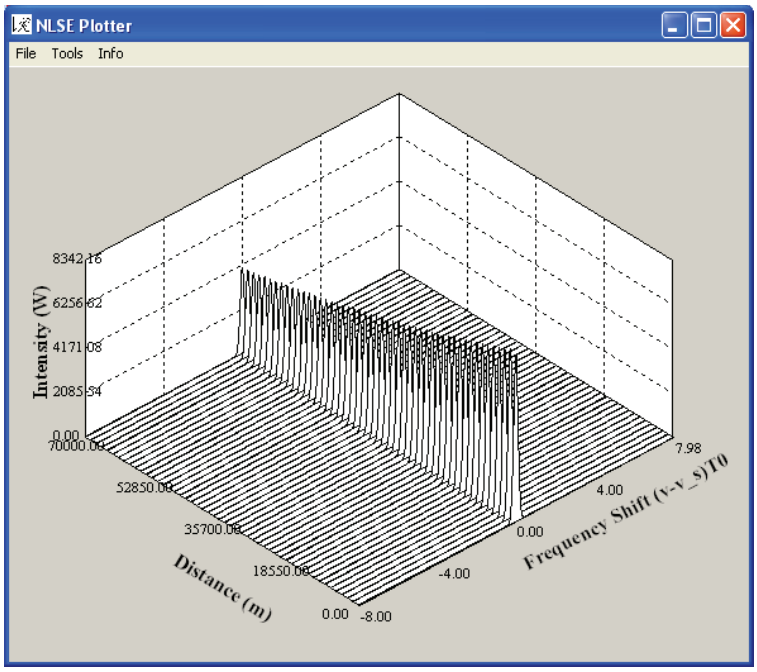



***FIGURA 3.49Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF(L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Los efectos de SPM y GVD no alteran el ancho de banda original. Como se aprecia en la Figura 3.48 y Figura 3.49, dicho ancho temporal se mantiene constante a lo largo de toda la propagación.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

Ahora se observará un incremento en el ancho de banda de la señal debido a la potencia óptica elevada. Este incremento en el ancho de banda afectará a los canales adyacentes (en el caso de sistemas DWDM) ya que existirá una interferencia, lo que produce una transmisión con una tasa de errores alta.

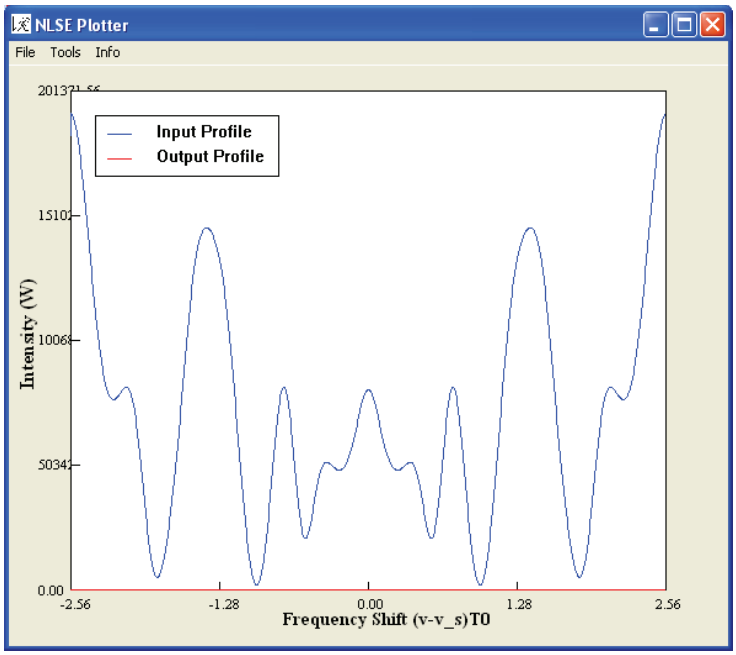



***FIGURA 3.50Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

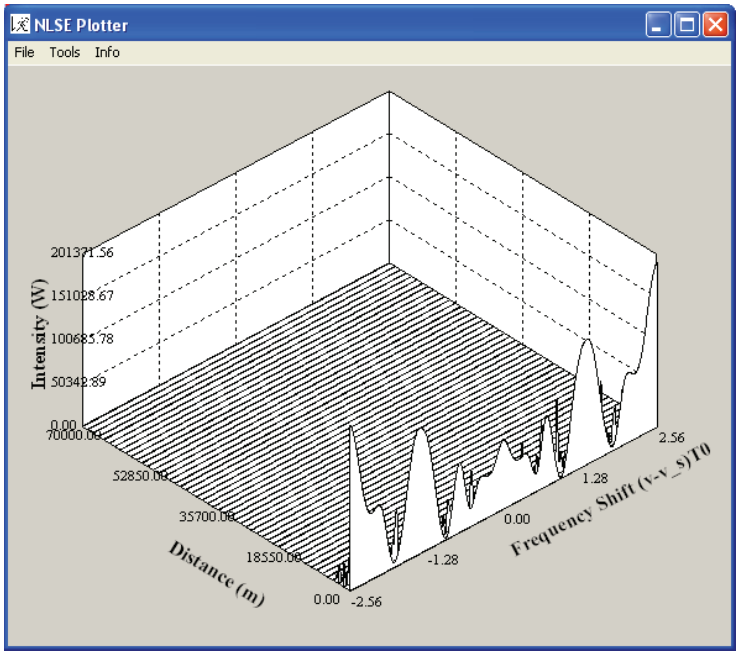



***FIGURA 3.51Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

Como se observa en ambos gráficos, existe un incremento del ancho de banda sobre la frecuencia central del pulso óptico. En este caso simplemente se observa el aporte de SPM, ya que en lo que refiere a GVD no existe un incremento del espectro.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

En este caso el pulso óptico tendrá un cambio en el espectro debido al incremento de la velocidad de transmisión. La diferencia que se tiene respecto al caso en que se transmite pulsos de ancho igual a 100ps, es que ahora los pulsos son ultracortos (duración temporal menor).

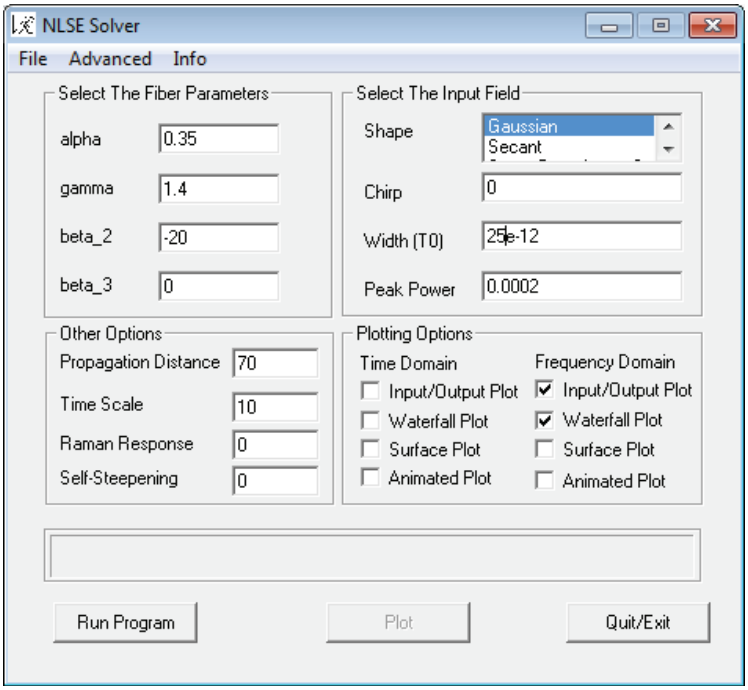



***FIGURA 3.52 Introducción de datos para fibras monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

A continuación se indican las simulaciones obtenidas en el software NLSE Solver 1.

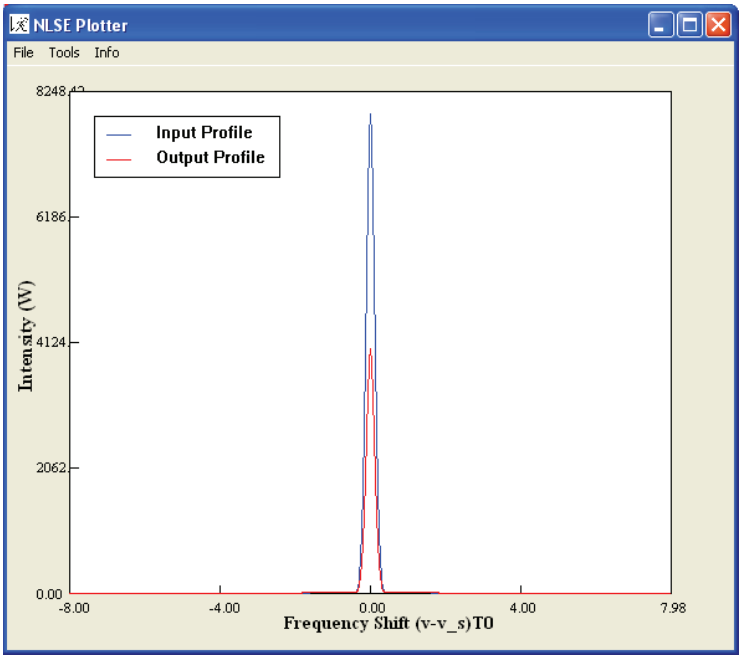



***FIGURA 3.53Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

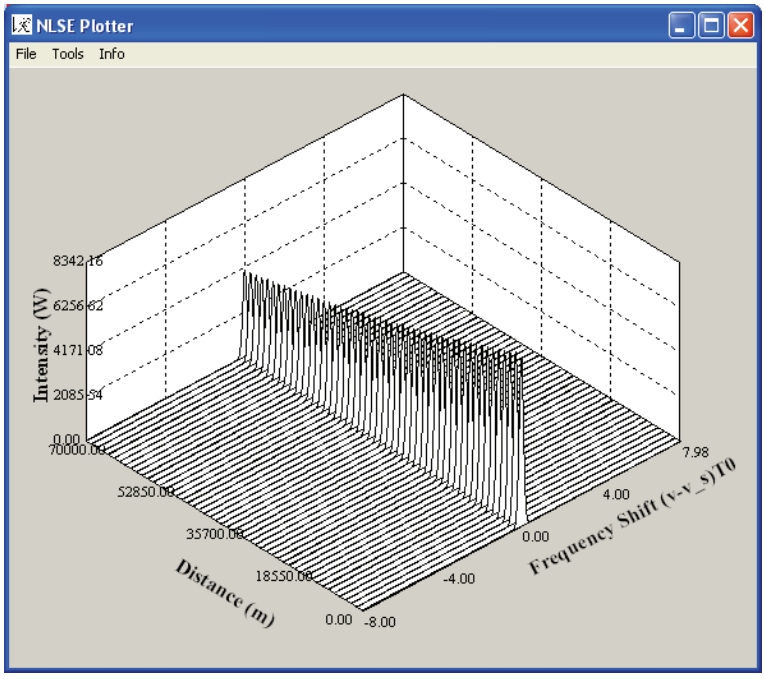



***FIGURA 3.54Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

Dentro de este análisis, este caso es el más degradante para la transmisión debido a que SPM y GVD ensanchan el espectro de frecuencias.

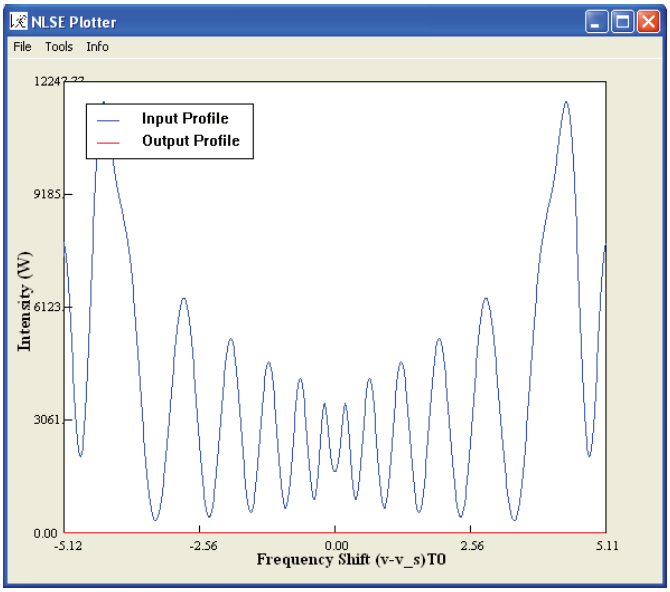



***FIGURA 3.55Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

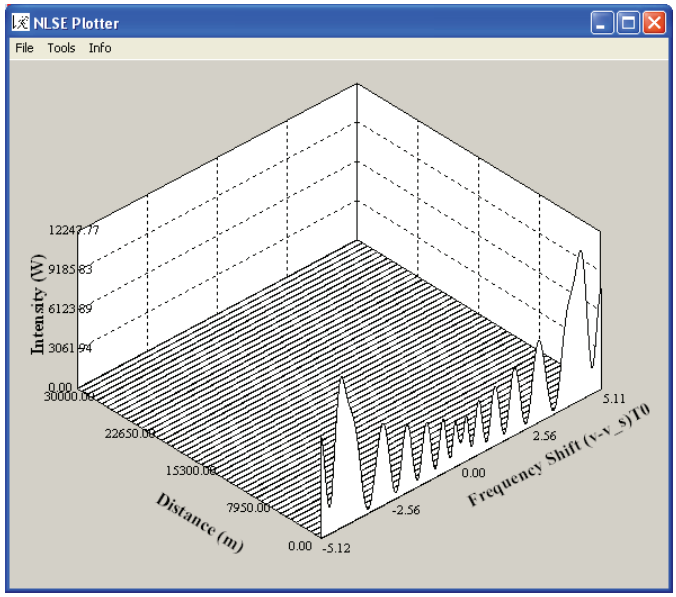



***FIGURA 3.56Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=70Km, P=20mW y T0=25ps)***

En este caso se observa el incremento de picos sobre la frecuencia central del pulso. Esto se observó claramente en el análisis matemático de SPM. Mientras mayor era la velocidad de transmisión y la potencia óptica, SPM tenía un mayor impacto sobre el ancho de banda.

### 3.4.2.3 Simulación de SPM en fibras monomodo DSF de longitud L=200Km

Para completar el análisis de SPM sobre fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada (DSF), a continuación se realizarán las simulaciones correspondientes a una transmisión sobre fibras ópticas de L=200Km.

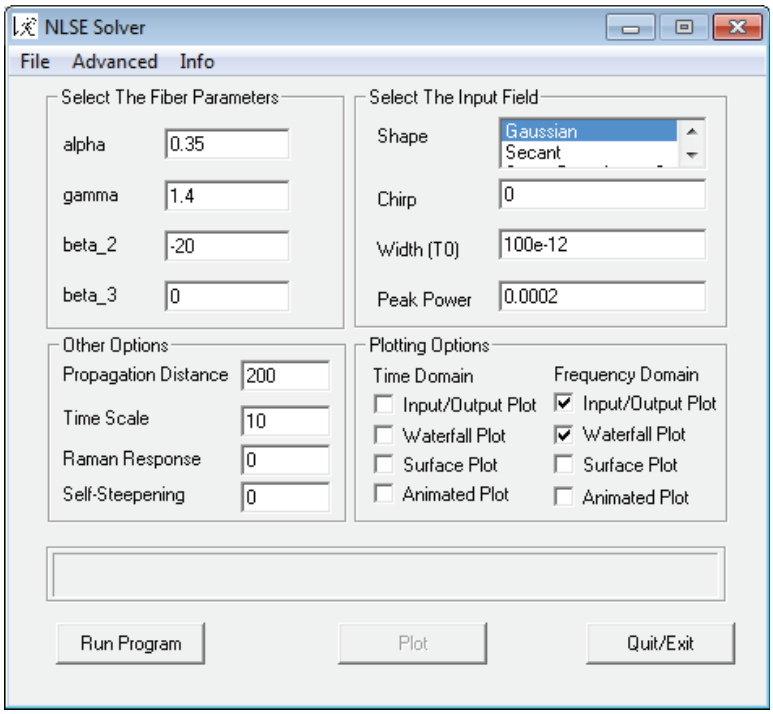



***FIGURA 3.57 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km y P=2mW, $T_0$=100ps)***

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

En este caso se observa que ni SPM ni GVD tienen impacto en la transmisión, puesto que la potencia y velocidad de transmisión son bajas.

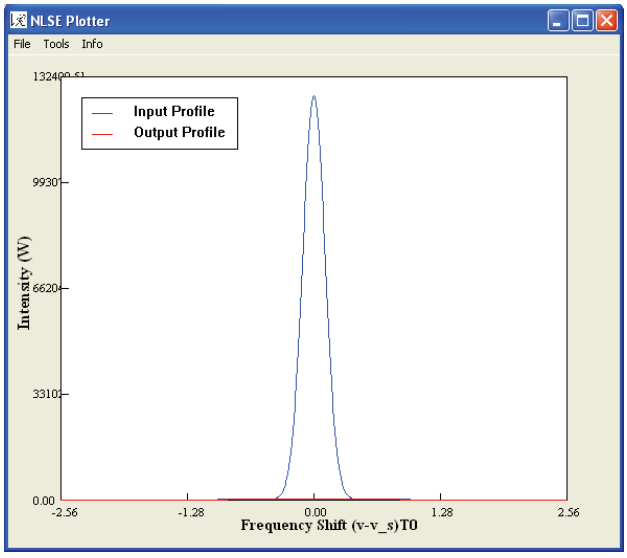



***FIGURA 3.58 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

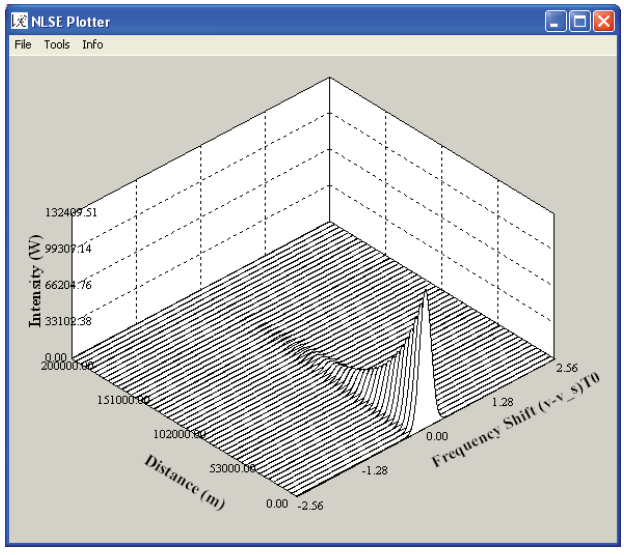



***FIGURA 3.59Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

En la Figura 3.59se puede apreciar la disminución de la potencia a medida que el pulso se propaga por el núcleo de la fibra óptica. Además se observa en la Figura 3.58que el ancho de banda se mantiene constante.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

En este escenario SPM tiene predominio sobre la calidad de la transmisión, ya que el incremento de la potencia óptica permite que aparezcan los efectos no lineales. A pesar de que la velocidad de transmisión es 10Gbps existe ensanchamiento espectral de la señal óptica.

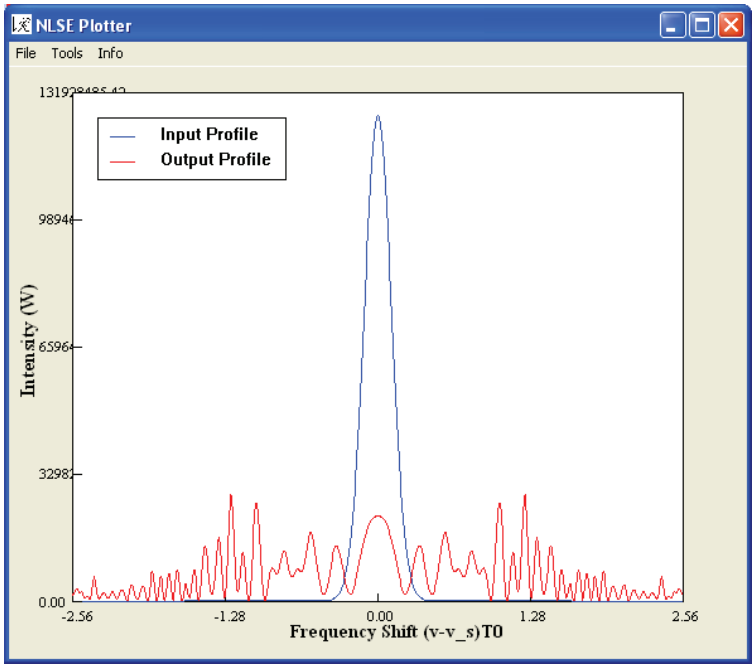



***FIGURA 3.60Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

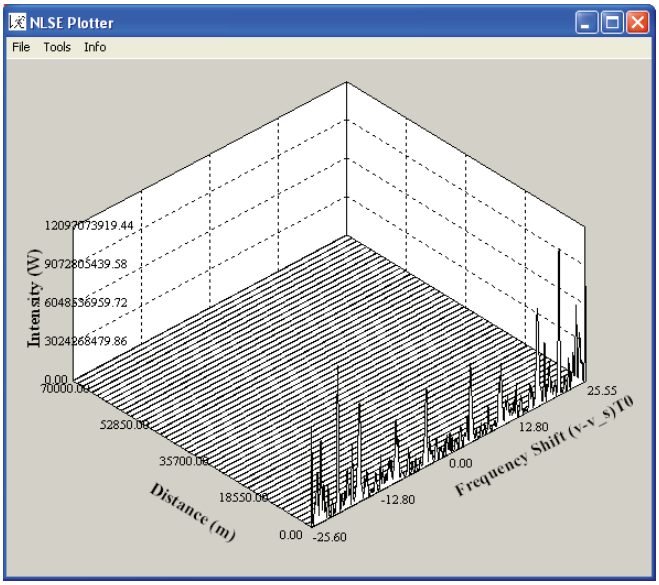



***FIGURA 3.61Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

Como se observa en ambas gráficas, existe un incremento en el ancho de banda además de atenuación de la señal óptica transmitida.

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

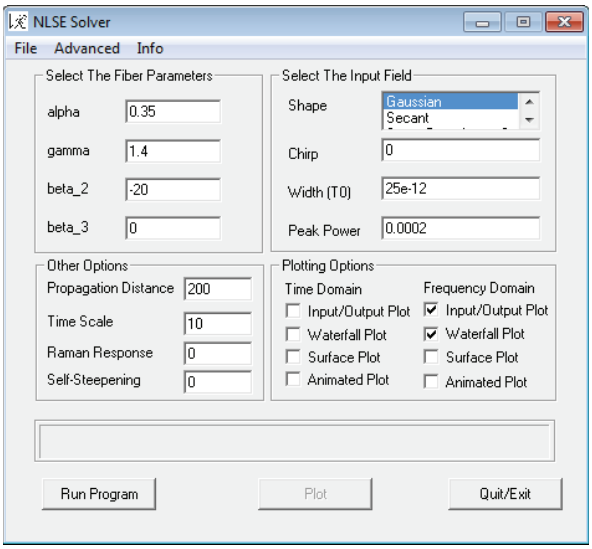



***FIGURA 3.62 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

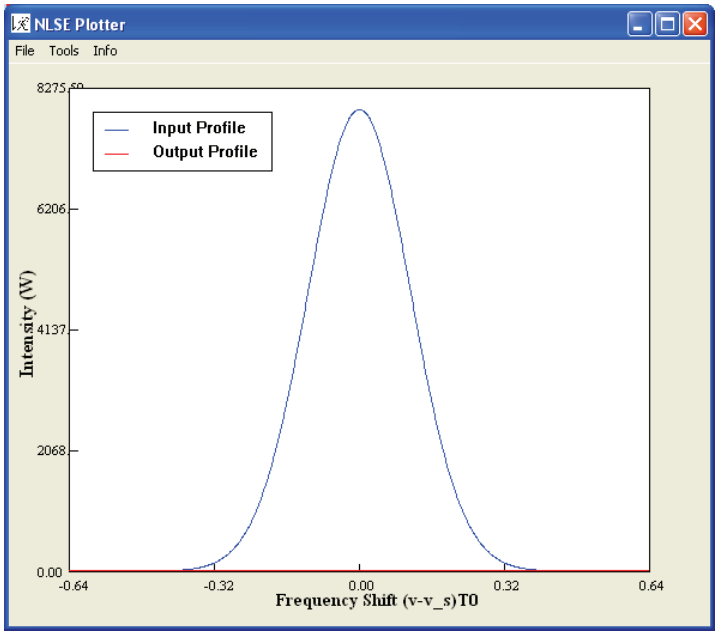



***FIGURA 3.63Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

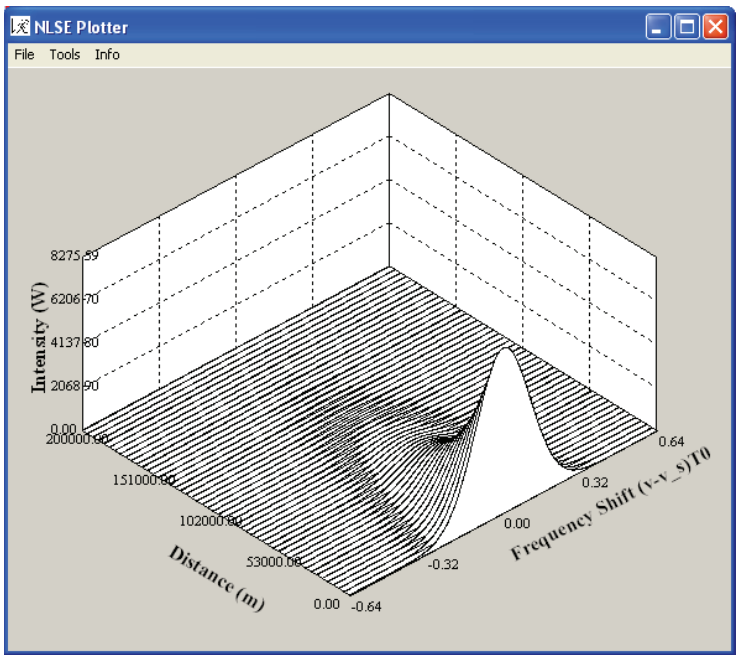



***FIGURA 3.64Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

En este caso se observa en primer lugar que los pulsos tienen una menor duración debido al incremento de la velocidad de transmisión; y, en segundo lugar se observa que no existe incremento del ancho de banda debido a la baja potencia de transmisión.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

En este último caso se observa un incremento elevado en el ancho de banda debido en primer lugar a la larga distancia de propagación de los pulsos, en segundo lugar a la potencia de transmisión alta lo que produce el ensanchamiento espectral debido a SPM y en tercer lugar a que los pulsos son transmitidos a gran velocidad lo cual produce un ensanchamiento espectral provocado por GVD. Los resultados obtenidos son los siguientes:

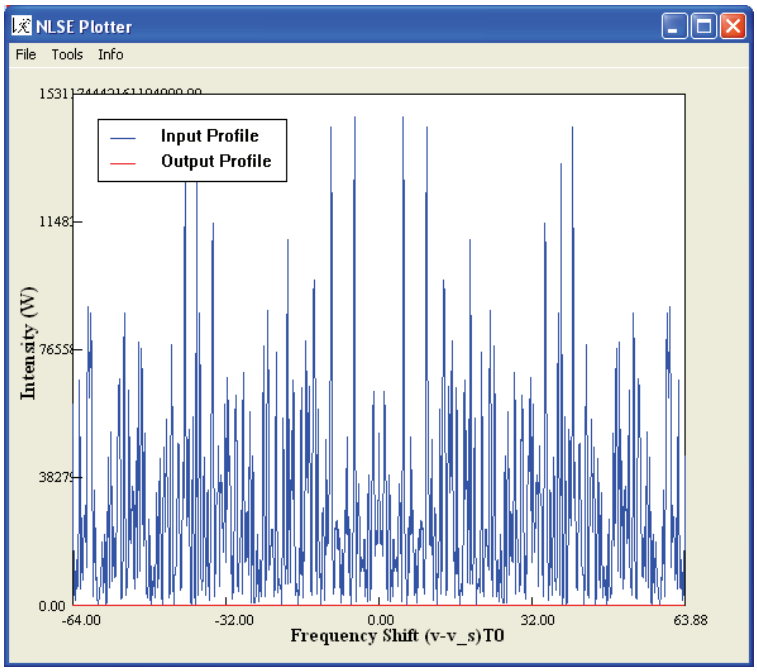



***FIGURA 3.65Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

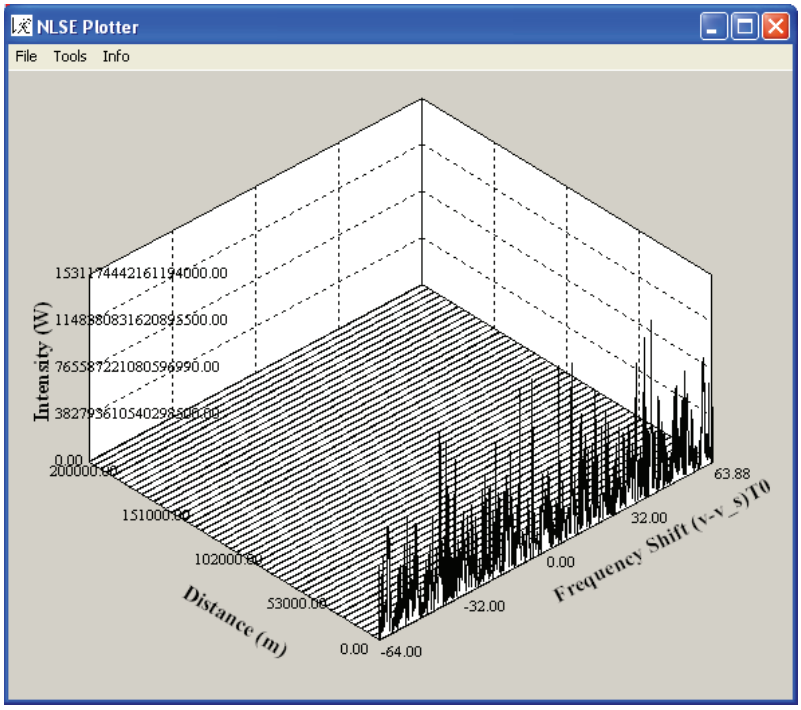



***FIGURA 3.66Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

Como se observó a lo largo del análisis gráfico de SPM sobre fibras ópticas DSF, el incremento espectral es menor que el obtenido en las fibras SSMF. Este decremento se debe a que el área efectiva del campo modal de la fibra DSF es mayor que el SSMF. Mientras mayor es el área efectiva del campo modal de la fibra, los efectos de SPM son menores debido a que el parámetro no lineal disminuye.

### 3.4.3 Simulación de SPM en fibras ópticas de dispersión desplazada no nula (NZ-DSF)

Para finalizar el análisis gráfico de SPM utilizando la herramienta de software, a continuación se realizará las respectivas simulaciones para el caso de fibras ópticas monomodo de dispersión desplazada no nula (NZ-DSF).

Para este tipo de fibras ópticas, el parámetro no lineal tiene un valor mayor que el determinado en las fibras SSMF lo que implica que los efectos no lineales frente a dichas fibras son de mayor consideración; y, a su vez el valor del parámetro no lineal

es menor que el calculado para las fibras DSF. Este valor se debe a la variación en el diámetro del núcleo de la fibra (menor que el diámetro de SSMF y mayor que DSF).

En el software NLSE Solver se introducen los valores mostrados en la sección 3.3, es decir:

- El coeficiente de atenuación ($\alpha = 0.35\, dB/Km$)
- El ancho inicial del pulso ($T_0 = 100ps\ o\ T_0 = 25ps$)
- La potencia óptica ($P = 2mW\ o\ P = 20mW$)
- El coeficiente de dispersión de segundo orden ($\beta_2 = -20\, ps^2/Km$)
- La longitud de la fibra ($L = 30Km, L = 70Km\ o\ L = 200Km$)
- El coeficiente no lineal ($\gamma = 1.25\ \ 1/(KmW)^{-1}$).
- El coeficiente de dispersión de tercer orden es cero ($\beta_3 = 0\ \ ps^3/Km$).

### 3.4.3.1 Simulación de SPM en fibras NZ-DSF de longitud L=30Km

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

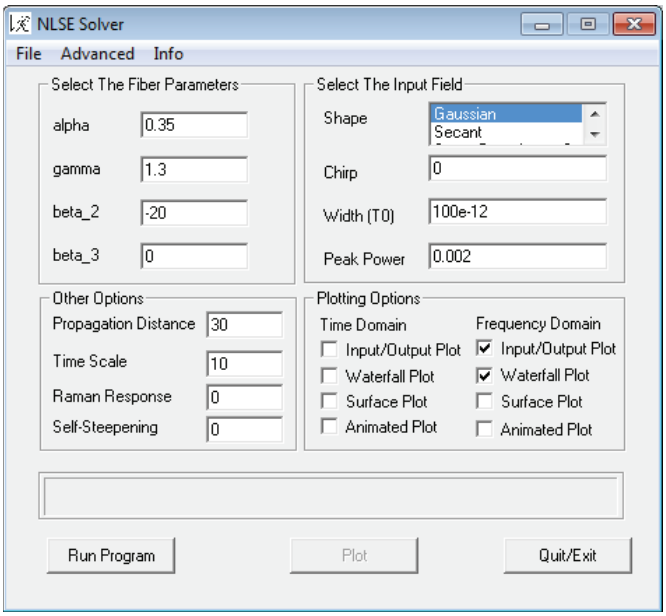



***FIGURA 3.67 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Los resultados de las simulaciones son los siguientes:

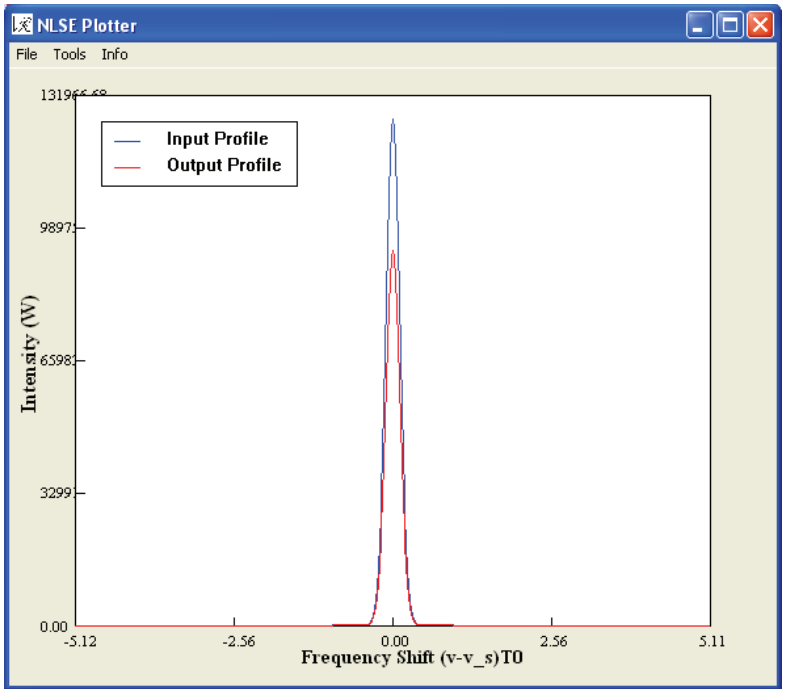



***FIGURA 3.68Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

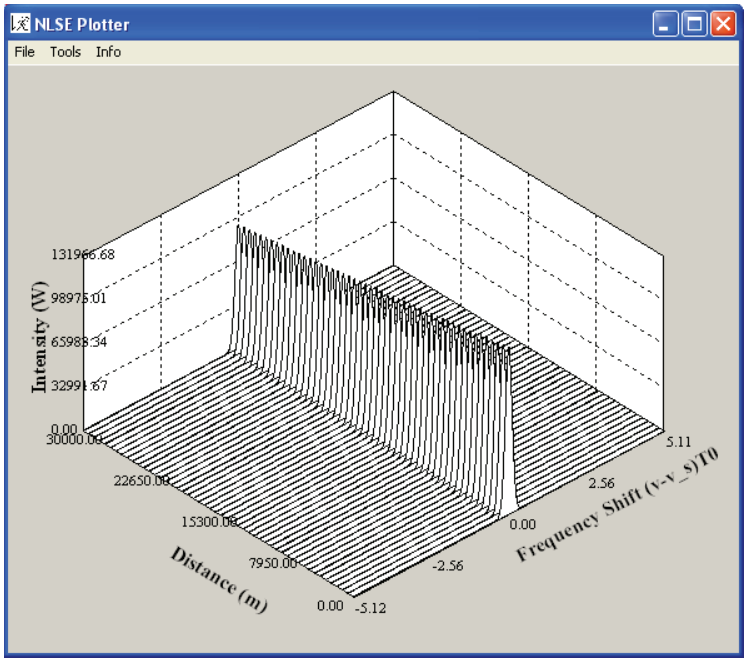



***FIGURA 3.69Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

En las Figuras 3.68 y 3.69 se observa que la señal no sufre ningún efecto puesto que ni la potencia ni la velocidad de transmisión son altas como para distorsionarla.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

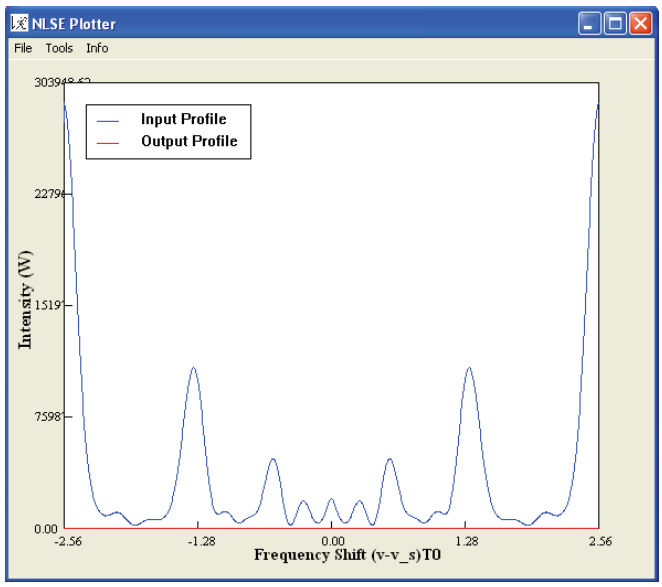



***FIGURA 3.70 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

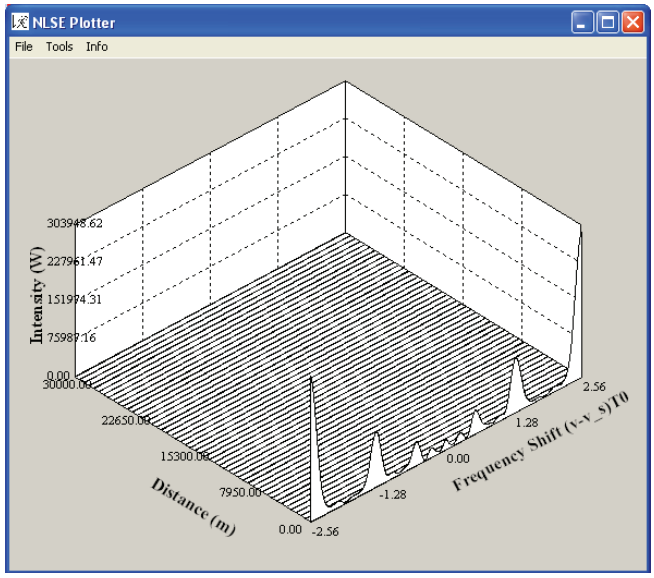



***FIGURA 3.71Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

En este caso se observa que el espectro se ensancha simétricamente con respecto a la frecuencia central del pulso puesto que la potencia de transmisión incrementó.

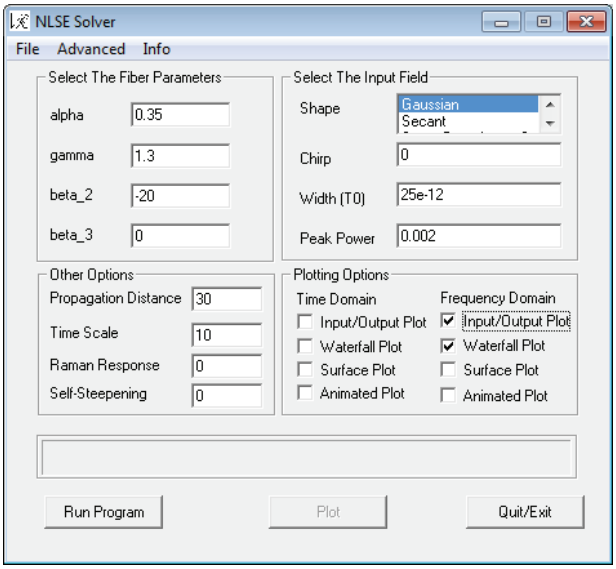



***FIGURA 3.72 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

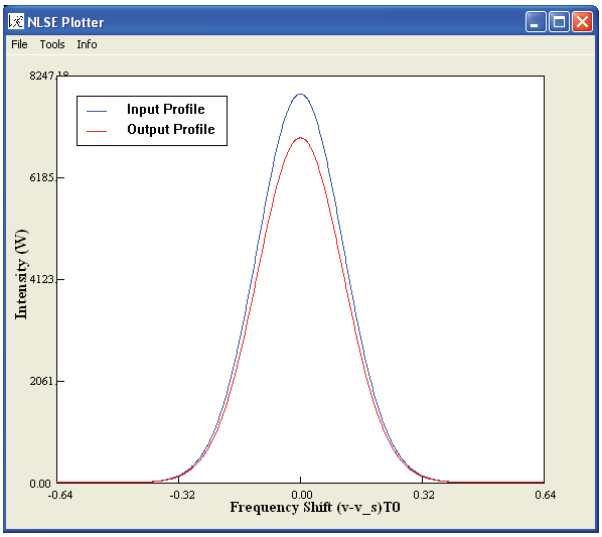



***FIGURA 3.73Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

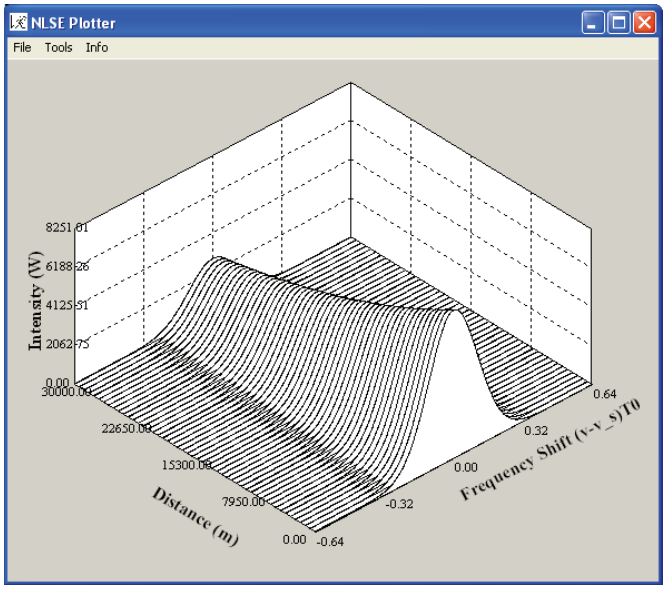



***FIGURA 3.74Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

En este caso se puede observar que el ancho de banda se incrementa debido a que los pulsos tienen una duración temporal menor.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

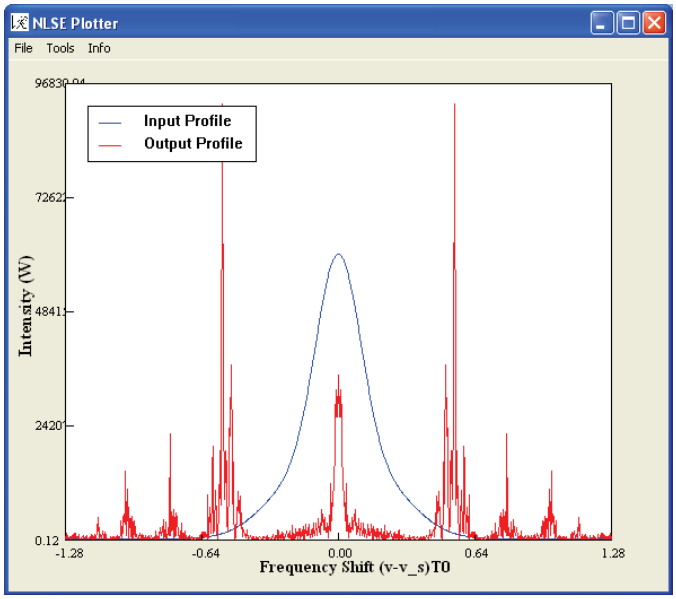



***FIGURA 3.75Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

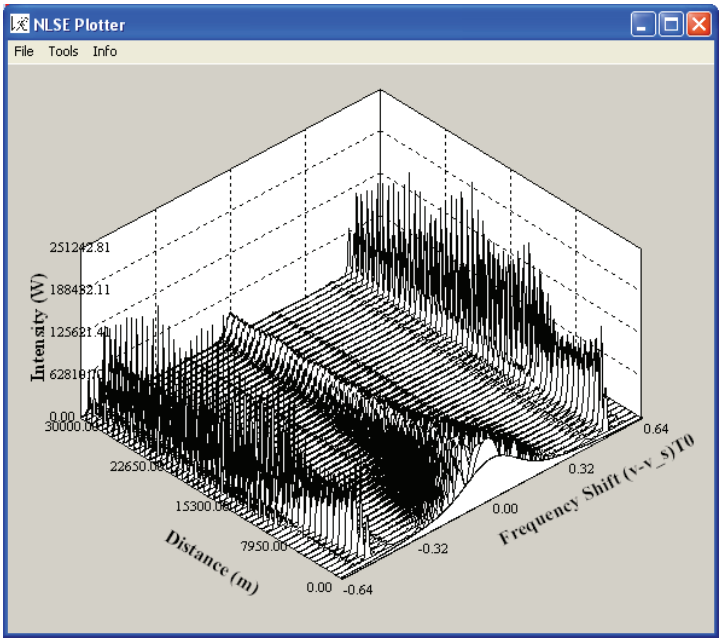



***FIGURA 3.76Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=30Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

Se puede observar en este caso que el ensanchamiento es producido por las dos componentes tratadas en el capítulo 2, es decir, la automodulación de fase (SPM) y la dispersión de la velocidad de grupo (GVD).

En la Figura 3.75 y Figura 3.76 existen varias componentes de frecuencias, lo que producirá una interferencia con los canales adyacentes en el caso de transmitir la información en multiplexores DWDM.

A medida que se incrementa la longitud de la fibra los efectos de SPM son más degradantes para el espectro de frecuencias. A continuación se podrá apreciar dicha degradación.

### 3.4.3.2 Simulación de SPM en fibras monomodo NZ-DSF de longitud L=70Km

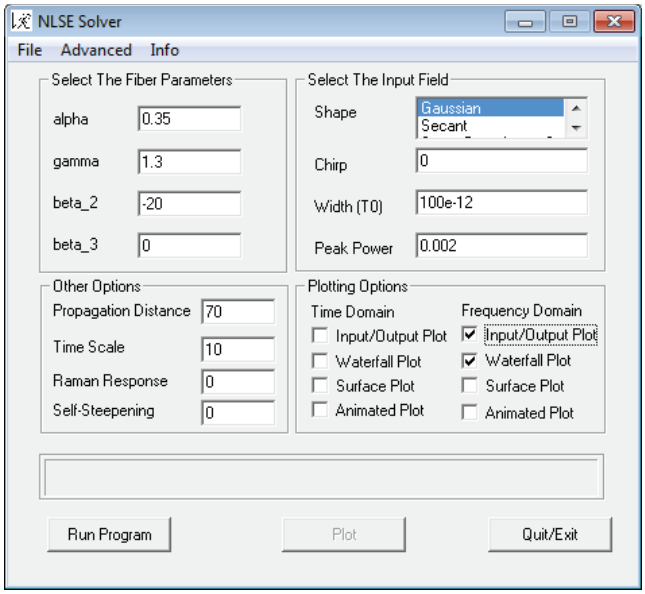



***FIGURA 3.77Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

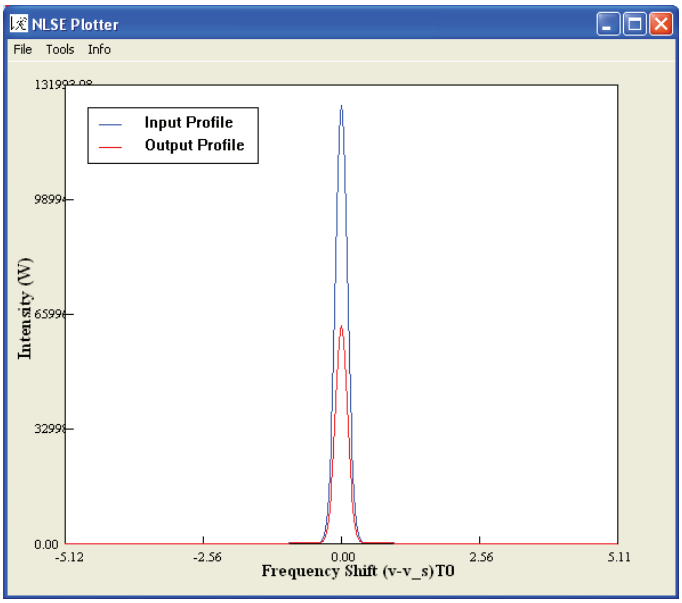



***FIGURA 3.78Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

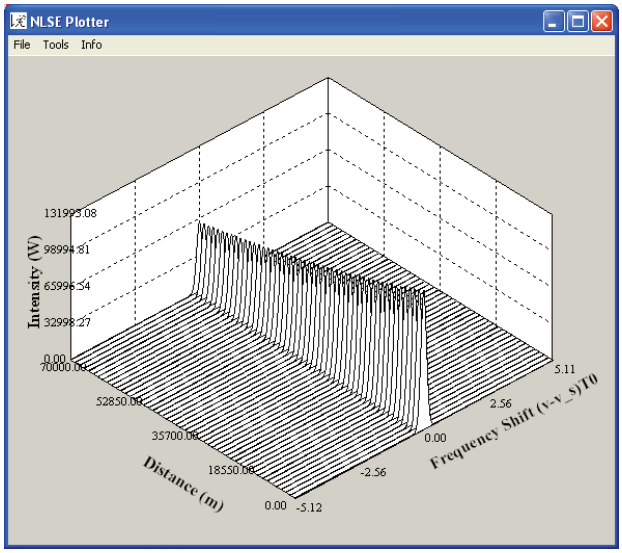



***FIGURA 3.79Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Como se observa nuevamente, en comparación con el ejemplo de L=30Km, la atenuación es el único factor que interviene en este caso.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

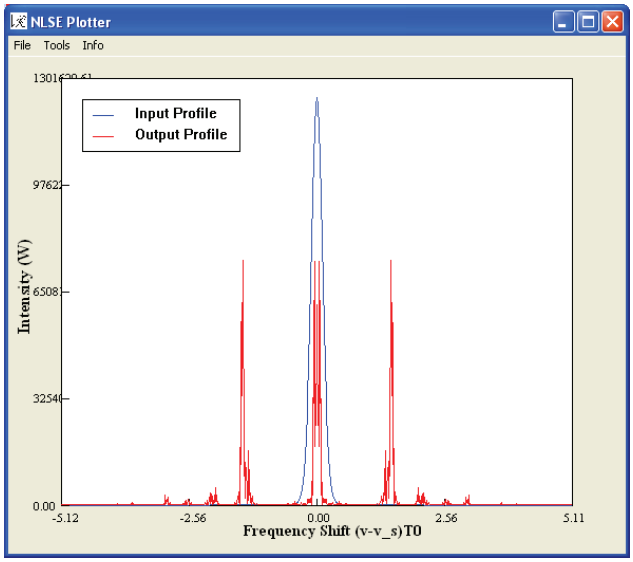



***FIGURA 3.80 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

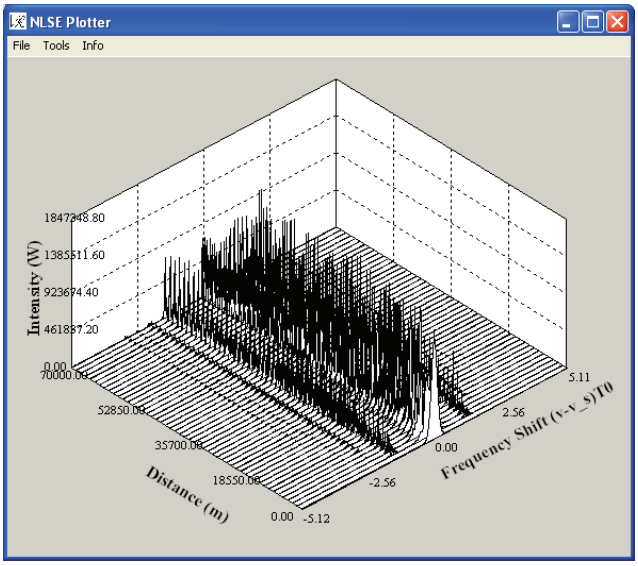



***FIGURA 3.81Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

El ensanchamiento producido en este caso se debe simplemente al aporte no lineal, es decir, debido a SPM. Existen variaciones en el espectro a lo largo de la transmisión como se puede apreciar en la Figura 3.80 y Figura 3.81.

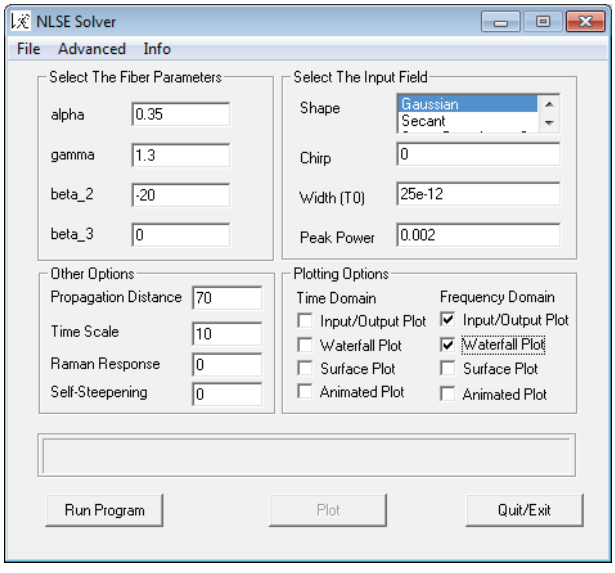



***FIGURA 3.82 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

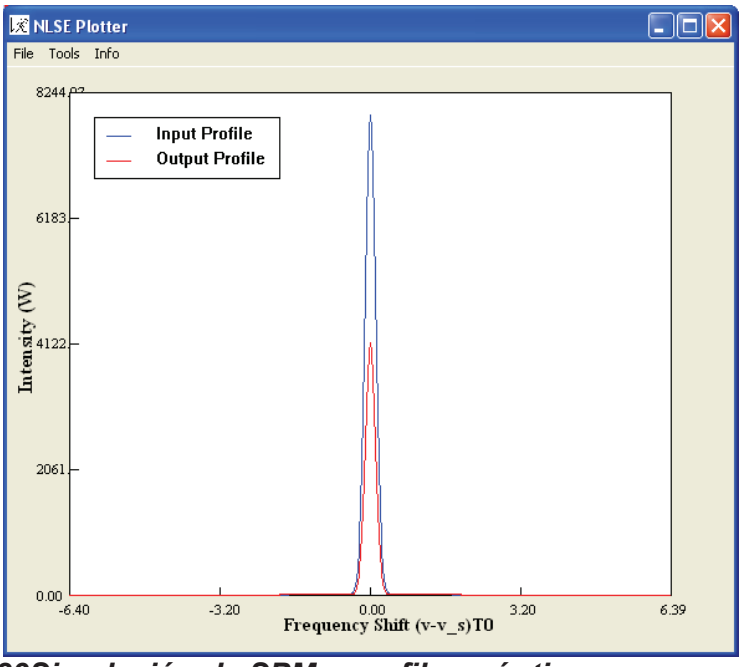



*FIGURA 3.83Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y $T_0$=25ps)*

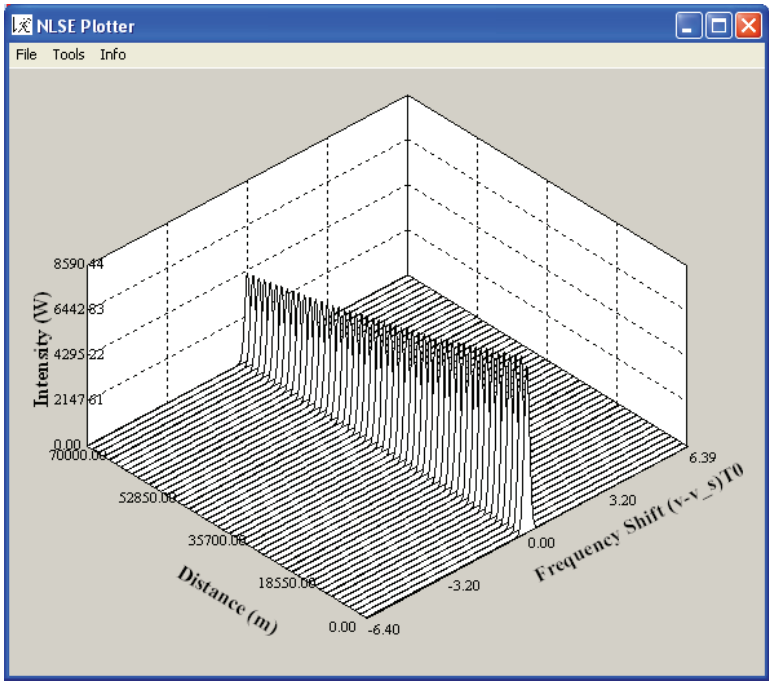



*FIGURA 3.84Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=2mW y T0=25ps)*

En este caso sólo se observa que el ancho de banda incrementa debido al aumento de la velocidad de transmisión. En este escenario no se presenta ensanchamiento espectral.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

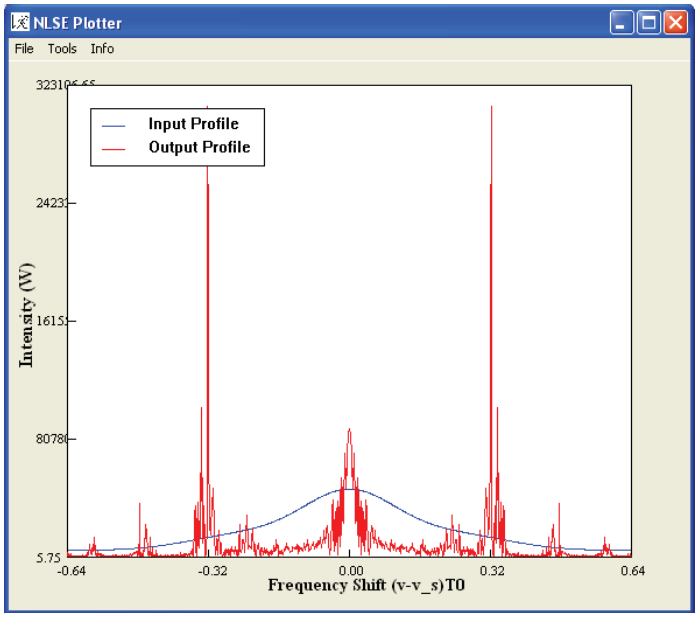



***FIGURA 3.85Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

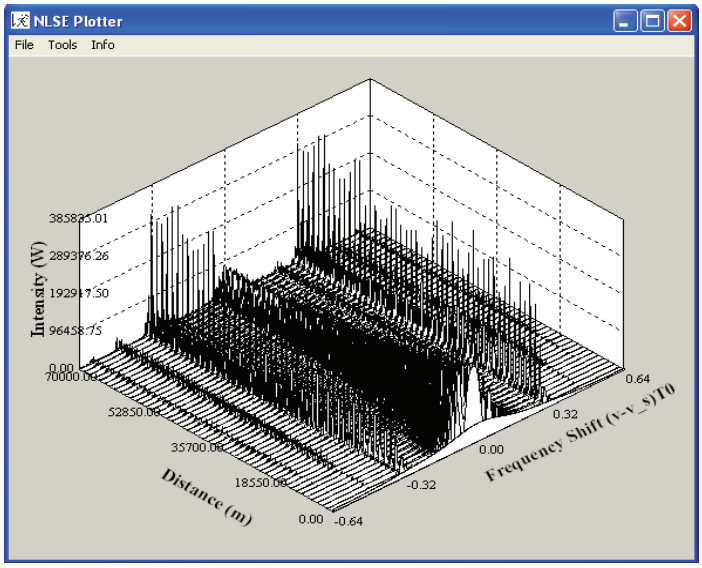



***FIGURA 3.86Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=70Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

En ambas figuras que se puede apreciar el ensanchamiento provocado por el aporte de SPM y GVD cuando éstos actúan conjuntamente. Esta degradación limita la transmisión en sistemas DWDM.

### 3.4.3.3 Simulación de SPM en fibras monomodo NZ-DSF de longitud L=200Km

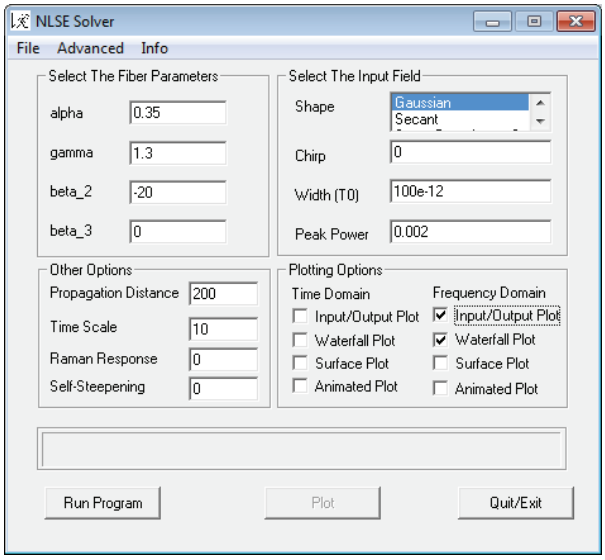



***FIGURA 3.87 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

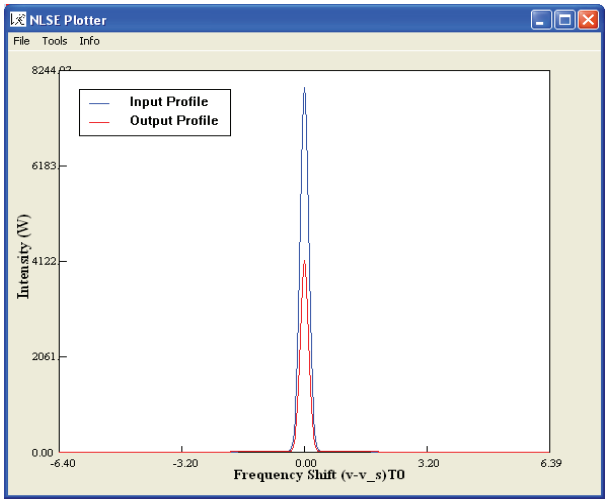



***FIGURA 3.88Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

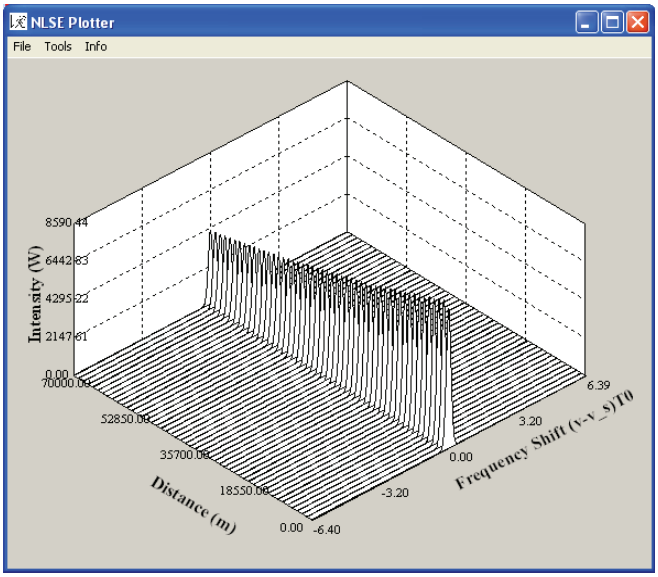



***FIGURA 3.89Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=100ps)***

Aun cuando la longitud de la fibra óptica se incrementó, los efectos de SPM no tienen influencia debido a que la potencia con la que se transmite la información es baja.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 10Gbps$:**

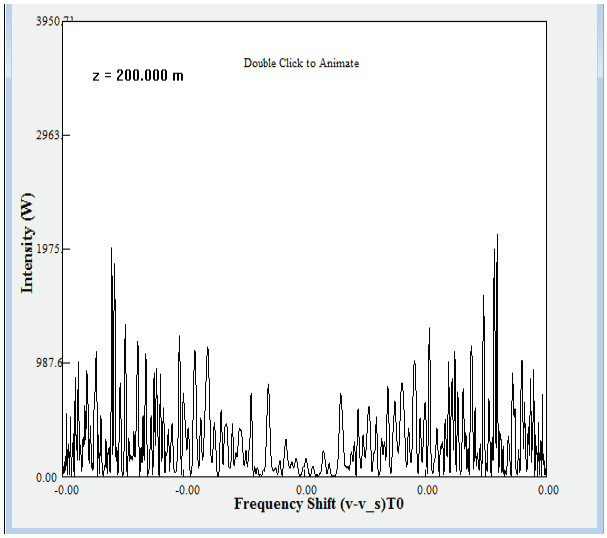



***FIGURA 3.90Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

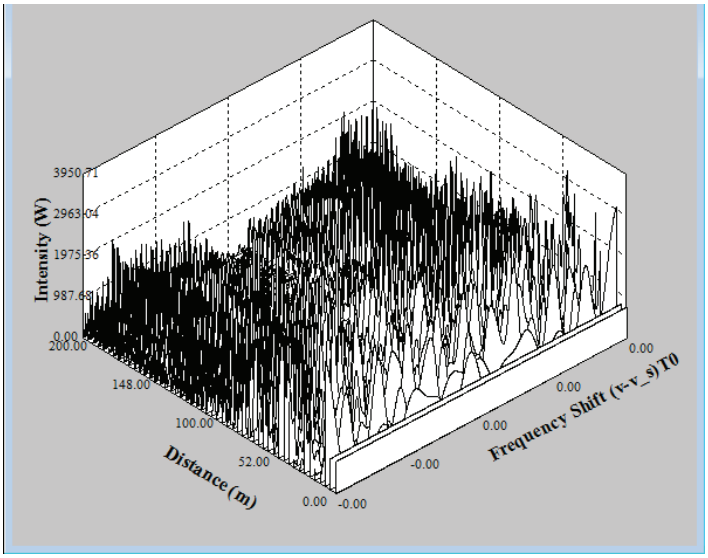



***FIGURA 3.91Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=100ps)***

En las siguientes simulaciones se puede observar cómo GVD aporta al ensanchamiento espectral. Este aporte se debe al incremento de la velocidad de transmisión.

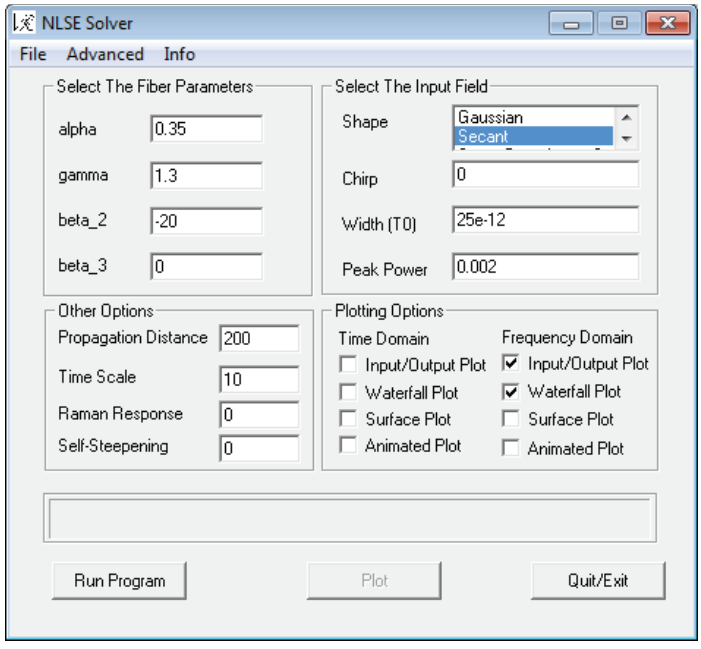



***FIGURA 3.92 Introducción de datos para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)***

- **Cuando $P = 2mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

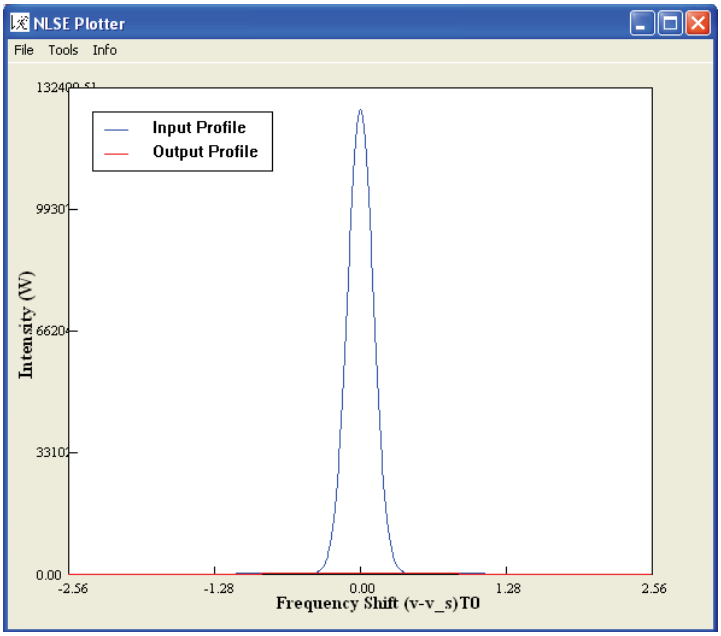



*FIGURA 3.93Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)*

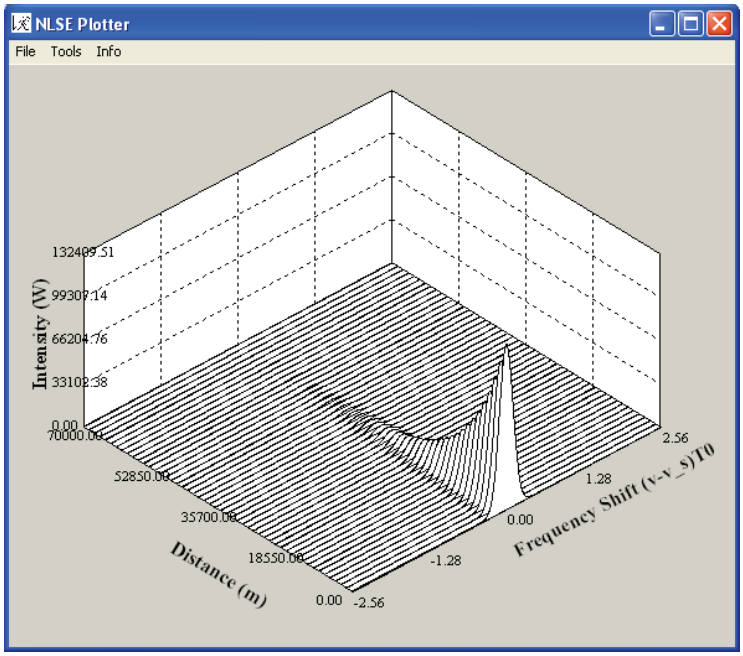



*FIGURA 3.94Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=2mW y $T_0$=25ps)*

En este escenario se puede observar el incremento del ancho de banda debido a que la tasa de transmisión es mayor. En lo que respecta SPM no existe incremento espectral ya que la potencia de transmisión es baja.

- **Cuando $P = 20mW$ y $V_t = 40Gbps$:**

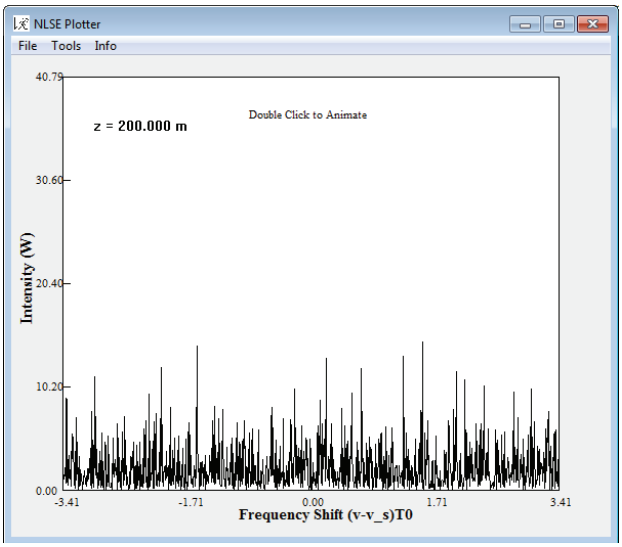



***FIGURA 3.95 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

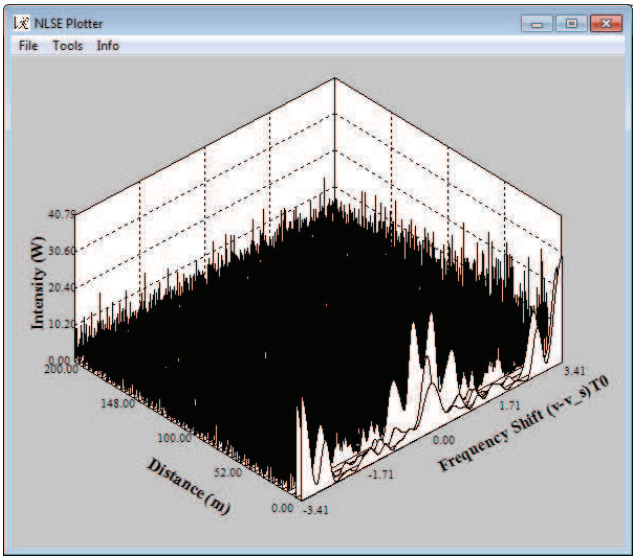



***FIGURA 3.96 Simulación de SPM para fibras ópticas monomodo NZ-DSF (L=200Km, P=20mW y $T_0$=25ps)***

Se puede apreciar en la Figura 3.95 y Figura 3.96 la degradación total del espectro debido a la velocidad y a la potencia de transmisión. En estas circunstancias no se podría hablar de una transmisión libre de errores, ya que esta tasa en este caso sería elevada.

De esta manera queda demostrado que las fibras ópticas monomodo DSF son las que peor respuesta presentan ante los efectos de SPM, debido a que son las fibras ópticas monomodo con menor área efectiva del campo modal.

Al contrario sucede con las fibras ópticas monomodo estándar ya que son las que mejor respuesta frente a los efectos de la automodulación de fase presentan. Esta se debe a el área efectiva del campo modal es el mayor en comparación a los tres tipos de fibras analizadas.

## 3.5 ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN DE TERCER ORDEN (TOD)

Cuando la transmisión de los pulsos ópticos se realiza cerca de la longitud de onda de corte$\lambda_D$, se debe tomar en cuenta los efectos del coeficiente de dispersión de tercer orden. Para que existan dichos efectos sobre los pulsos ópticos la transmisión debería tener una separación alrededor de 10nm entre la longitud de onda de trabajo y la longitud de onda de la señal transmitida.

Como se indicó anteriormente se puede observar que SPM gobierna en la transmisión cuando $\bar{N} > 1$, eso significa que la longitud de dispersión de tercer orden debe ser mucho mayor que la longitud no lineal, de esta manera existirá ensanchamiento espectral.

Cuando se realizó el análisis de SPM en longitudes de onda lejanas a la de corte, se descartaba el parámetro $\beta_3$; esto no sucede cuando se transmite cerca de $\lambda_D$, es decir, no se puede descartar el aporte del coeficiente de segundo orden, puesto que esto significaría desechar el aporte de la dispersión provocada por GVD. Los valores que $\beta_2$ toma en este análisis son cercanos a cero.

En este caso el efecto que provoca SPM en el espectro es el de aumentar el número de oscilaciones en los bordes de la forma del pulso, aunque la intensidad no llega a ser cero en la mínima oscilación, lo que significa que existe un mayor incremento en el ancho de banda y como consecuencia existe interferencia con otros canales de frecuencia en sistemas DWDM.

A continuación se procederá a indicar ejemplos de simulaciones de ensanchamientos espectrales obtenidas cuando se trabaja cerca de $\lambda_D$. Se variará el coeficiente de dispersión de tercer orden a fin de observar cómo SPM afecta a la transmisión cuando se trabaja cerca de dicha longitud de onda.

Por efectos de estudio la simulación se la realiza en base a los parámetros de la fibra óptica monomodo SSMF cuando se transmiten pulsos a una velocidad de transmisión de 10Gbps.

*a) Cuando L=30Km y* $\beta_3 = 4\,ps^3/Km$*:*

En este primer caso, la transmisión se realiza con un coeficiente de dispersión de tercer orden igual a $4\ ps^3/Km$ para observar la evolución del espectro de frecuencias.

Se toma en cuenta un valor mínimo de $\beta_2$ para no descartar el aporte de GVD. Adicionalmente se realizará el análisis sobre una longitud constante (L=30Km).

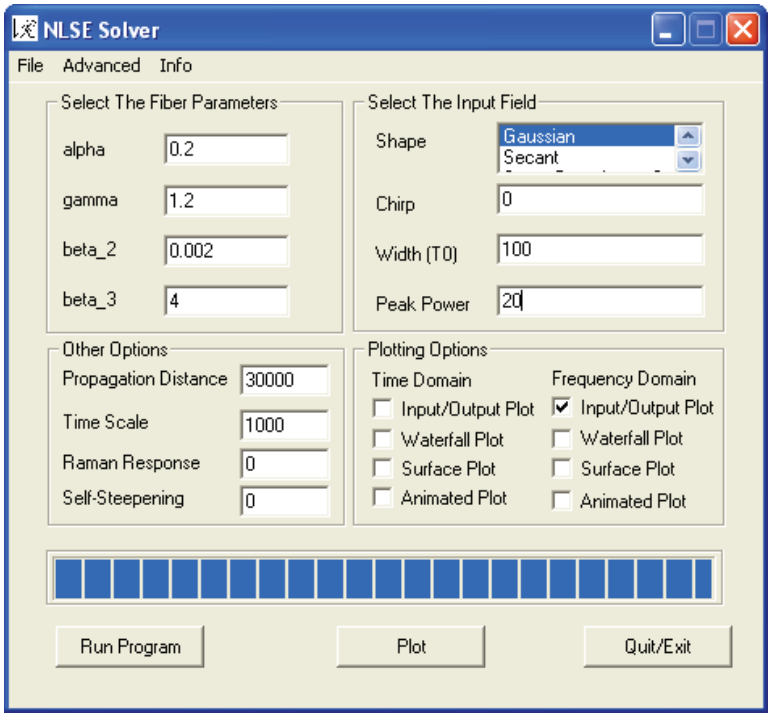



***FIGURA 3.97 Datos introducidos en el software ($\beta_3 = 4\ ps^3/Km$)***

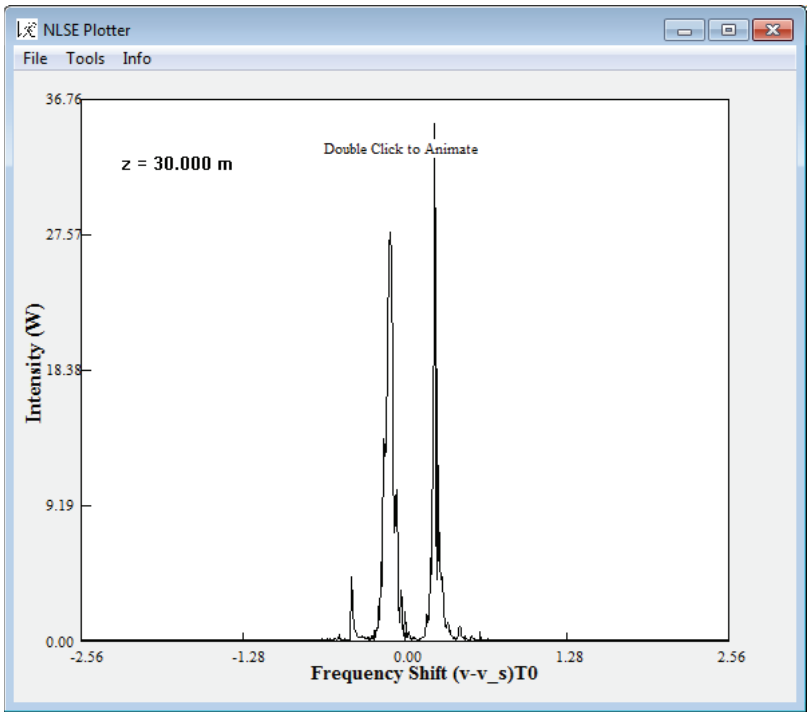



***FIGURA 3.98 Respuesta de SPM para fibras ópticas monomodo cuando $\beta_3 = 4\,ps^3/Km$***

Como se puede ver en el resultado gráfico, se observa que sobre la frecuencia central del pulso se generan nuevas componentes de frecuencia, lo que produce que si exista una interferencia. Las nuevas componentes de frecuencia no son simétricas respecto a la frecuencia central del pulso.

A continuación se observará cómo afecta la variación del parámetro $\boldsymbol{\beta_3}$.

*b) Cuando L=30Km y* $\beta_3 = 2\,ps^3/Km$*:*

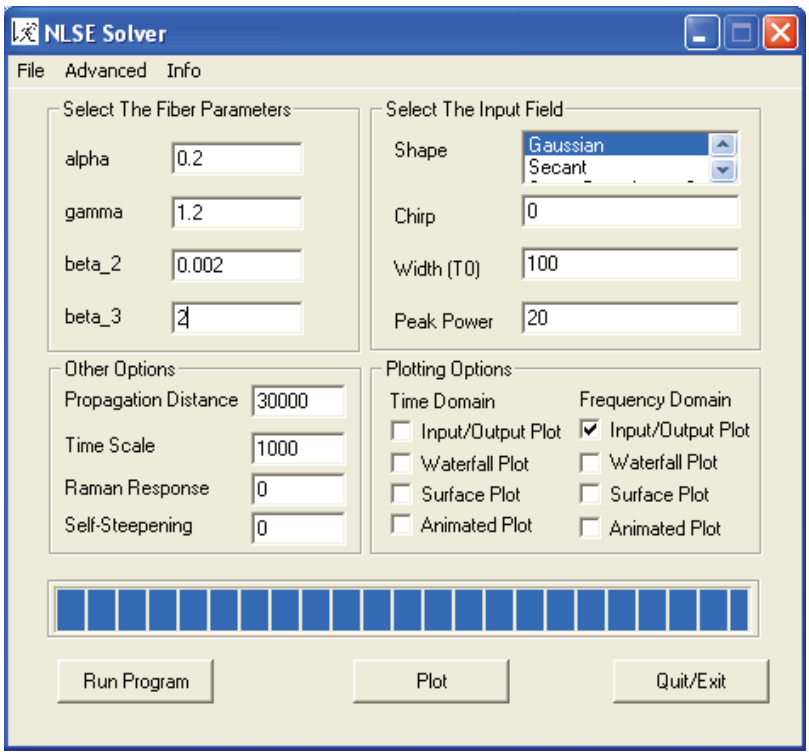



***FIGURA 3.99 Datos introducidos en el software*** ($\beta_3 = 2\,ps^3/Km$)

Y la respuesta que se obtiene cuando se utilizan los parámetros indicados en la Figura 3.99 es la siguiente:

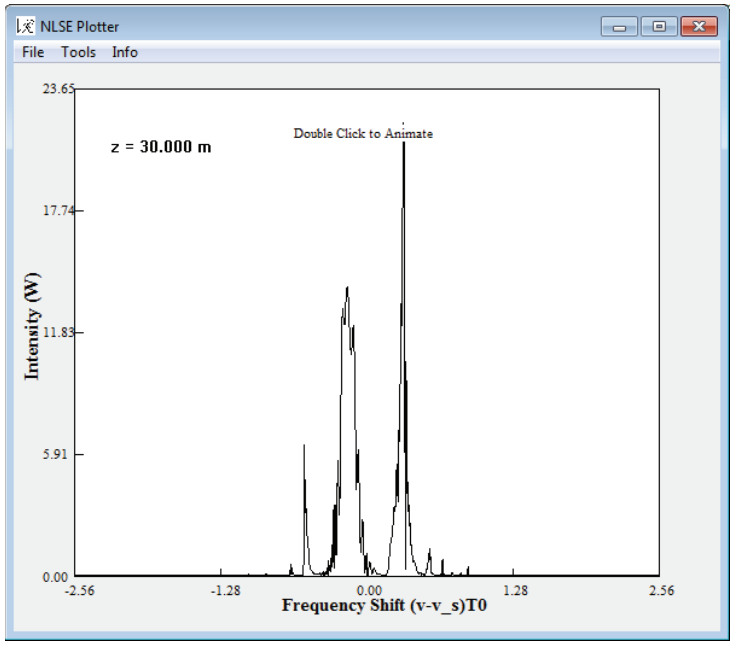



***FIGURA 3.100 Respuesta de SPM para fibras ópticas monomodo cuando*** $\beta_3 = 2\ ps^3/Km$

c) *Cuando L=30Km y* $\beta_3 = 1\,ps^3/Km$*:*

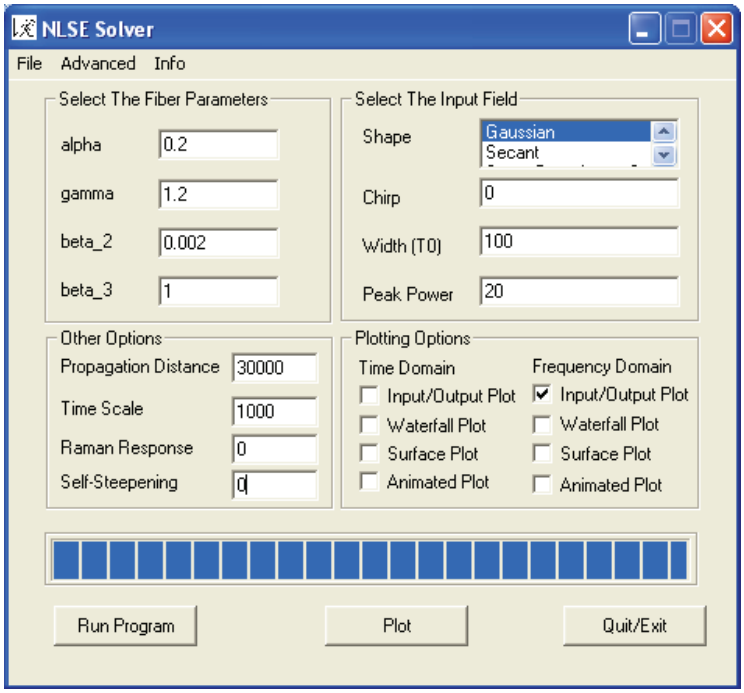



***FIGURA 3.101 Datos introducidos en el software*** ($\beta_3 = 1\,ps^3/Km$)

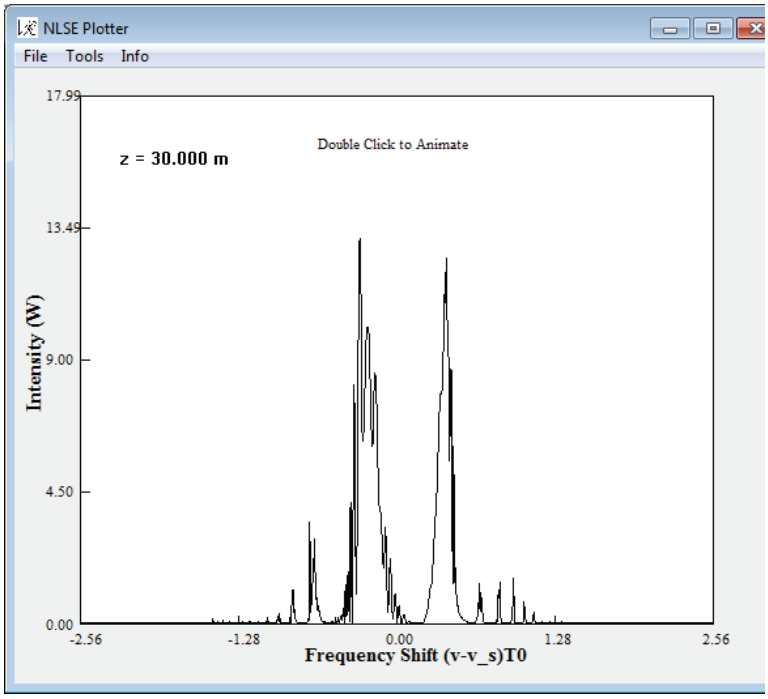



***FIGURA 3.102 Respuesta de SPM para fibras monomodo cuando*** $\beta_3 = 1\,ps^2/Km$

Para realizar un análisis detalladode los resultados matemáticos conjuntamente con las simulaciones se debe recurrir a la Tabla 2.16 y a las gráficas obtenidas del capítulo 3, puesto que en ellas se encontrará similitudes o diferencias y así visualizar los efectos de SPM en cada uno de los escenarios estipulados. Con esta comparación se pretende indicar los diferentes resultados que se obtienen una vez que se ha variado los parámetros sobre diferentes tipos de fibras ópticas monomodo (SSMF, DSF y NZ-DSF) como medio de transmisión.

Puesto que cada tipo de fibra óptica monomodo tiene sus propios parámetros físicos y de transmisión, los efectos de SPM difieren entre cada una de las fibras.
Dependiendo de los requerimientos de la transmisión (distancia entre el origen y destino, velocidad con que se transmiten los pulsos ópticos) se debe seleccionar los valores de los parámetros, de tal manera que el efecto de SPM sea el mínimo posible.

El software NLSE Solver se basa en la ecuación no lineal de Schrödinger, involucrando los parámetros que intervienen en el análisis de SPM; si a estos parámetros se les realiza variacionesse obtendrán diferentes resultados gráficos (definidos en cada escenario),por lo tanto es necesario realizar un análisis de estas variaciones para definir el comportamiento de SPM en la transmisión de pulsos ópticos.

- **Longitud de la fibra óptica:** Cuando la longitud de la fibra óptica es incrementada, la atenuación resulta ser uno de los parámetros que más influye en la transmisión, puesto que a mayor distancia mayor pérdida de potencia en la recepción, la cual puede ser compensada con el uso de amplificadores. Para el caso de la Figura 3.6 puesto que el coeficiente de atenuación es cero (transmisión ideal), no se observa pérdida de potencia óptica; pero al analizar todas las simulaciones, que consideran un coeficiente de atenuación se observa que a una determinada longitud de la fibra se pierde potencia óptica.

  Cuando la longitud de la fibra es cada vez mayor los efectos de SPM son más considerables puesto que la longitud efectiva de la fibra aumenta produciéndose un desfase mayor entre el pulso transmitido y el pulso recibido, obteniendo como resultado un incremento en el ensanchamiento de los pulsos ópticos; esto se puede evidenciar en las simulaciones de los tres tipos de fibras ópticas monomodo (SSMF, DSF y NZ-DSF).

- **Área efectiva:** La fibra óptica monomodo SSMF presenta el valor más alto de área efectiva de las tres fibras, esto implica que los efectos no lineales serán menores en ella, puesto que este parámetro se encuentra ligado directamente a los efectos no lineales. Gráficamente este parámetro se manifiesta con el incremento de picos (generación de nuevas componentes de frecuencia) que aparecen sobre la frecuencia central del pulso óptico.

Al observar las simulaciones, la fibra DSF presenta el mayor número de oscilaciones ya que ésta tiene el valor más bajo de área efectiva, por lo que resulta más propensa a efectos no lineales; mientras que la fibra óptica monomodo NZ-DSF al presentar un área efectiva intermedia (mayor que DSF y menor que SSMF), presenta un número menor de picos a diferencia de la fibra óptica DSF pero mayor a SSMF. En la actualidad se dispone de fibras ópticas monomodo NZ-DSF de gran área efectiva en las cuales los efectos no lineales son menores debido a su amplio diámetro del campo modal.

- **Parámetro no lineal:** Cuando el parámetro no lineal aumenta se observa que el pulso óptico empieza a presentar picos en los bordes laterales del pulso, esto se debe a que este parámetro depende del valor del área efectiva que tiene la fibra óptica. Al comparar los valores obtenidos entre cada fibra óptica monomodo se visualiza que SSMF presenta el valor más bajo de parámetro no lineal seguido de la fibra NZ-DSF y por último la fibra DSF; siendo la última la fibra más propensa a los efectos de SPM por presentar un valor bajo en su área efectiva.

- **Potencia óptica:** Cuando se transmite con una potencia óptica de 2mW no se observa ninguna degradación por parte de SPM puesto que sus efectos empiezan a presentarse a partir de potencias incidentes superiores a los 10mW.Efectivamente, si la potencia de transmisión es de 20mW el espectro empieza a mostrar picos de frecuencia sobre la frecuencia central del pulso, lo cual produce como resultado interferencias en la transmisión.

  En las fibras ópticas monomodo (SSMF, DSF y NZ-DSF), cuando se transmite a 2mW en cualquier longitud no se observa ensanchamiento de los pulsos; y, cuando la transmisión es con P=20mW el ensanchamiento que presentan los pulsos depende de varios factores: la longitud de la fibra, la

velocidad con la que se transmiten los pulsos y en especial el valor del parámetro no lineal puesto que este último define la no linealidad de la fibra.

- **El ancho inicial del pulso:** Los ejercicios prácticos son realizados basándose en dos velocidades de transmisión: 10Gbps y 40Gbps. El ensanchamiento provocado por SPM por si solo afecta a la transmisión; si a este efecto se incrementa el ensanchamiento provocado por la dispersión cromática, la degradación de los pulsos será mayor en la recepción.

  En los tres tipos de fibras ópticas, si se transmiten pulsos con $V_T = 10Gbps$ o $V_T = 40Gbps$ cuando la potencia es 2mW las simulaciones no presentan ensanchamiento del pulso. Si la potencia de transmisión es 20mW con $V_T = 40Gbps$ entonces la degradación de los pulsos ópticos es mayor a comparación de la transmisión con $V_T = 10Gbps$. Si a esto se suma la longitud de la fibra se tiene que a mayor longitud, mucho mayor será el ensanchamiento.

# CAPÍTULO 4

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Cuando se va a realizar una transmisión utilizando fibra óptica como medio de transmisión, se debe tener en cuenta todos los parámetros asociados a ésta, como por ejemplo la distancia que existe entre dos nodos (origen y destino). Una vez que se determina la longitud de la fibra se debe tomar en cuenta los efectos que pueden provocarse, éstos deben ser determinados conjuntamente con la velocidad y la potencia de transmisión.

- Los efectos de la automodulación de fase son tomados en cuenta cuando se transmite con una potencia superior a los 10 mW, menor a esta potencia de transmisión los efectos a ser tomados en cuenta sólo serían los lineales como son: la atenuación, la dispersión modal, la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización.

- El coeficiente no lineal está en el rango de valores de 1,2 a 3 $W^{-1}Km^{-1}$, estos valores son estándares para los sistemas de comunicaciones ópticos utilizados en telecomunicaciones.

- Cuando la longitud no lineal es menor que la longitud de la fibra, los efectos no lineales deben ser tomados en cuenta para poder evitarlos o en su defecto atenuarlos al máximo posible, en este caso el efecto que SPM tiene en los pulsos es de mucha influencia debido a que el ensanchamiento del espectro será más pronunciado.

- Si la longitud de la fibra es mayor que la longitud de dispersión, los efectos de dispersión cromática deben ser tomados en cuenta para tratar de evitarlos o atenuarlos en su mayoría; y, así como se mencionó anteriormente, se debe tener en cuenta que el efecto dispersivo afectará con mayor intensidad a los pulsos propagados.

- Para que se produzca el efecto de SPM se debe cumplir que la longitud de la fibra debe ser mucho menor que la longitud de dispersión y a su vez debe ser aproximadamente igual a la longitud no lineal.

- Cuando se va a realizar una transmisión cerca de la longitud de onda de corte (con una diferencia de 10 nm) se debe tomar en cuenta el parámetro de dispersión de tercer orden $(\beta_3)$, puesto que éste indica la dispersión cromática que sufre el pulso óptico cuando se trabaja en dicha longitud de onda.

- En el efecto Kerr, el índice de refracción tiene dos componentes, una lineal y otra no lineal. La parte lineal depende exclusivamente del material en el cual se propaga la luz. El segundo componente del índice de refracción (componente no lineal) depende de la intensidad óptica que no es más que la potencia óptica sobre el área efectiva del campo modal. De ahí parte el origen de SPM y de la dependencia del índice de refracción de la potencia con la que se transmiten los pulsos.

- La longitud efectiva de una fibra óptica indica hasta qué distancia los pulsos ópticos experimentarán los efectos no lineales; por lo que, si la longitud efectiva es mucho mayor que la longitud de la fibra, los efectos no lineales serán importantes a lo largo de toda la transmisión.

- La forma de los pulsos desempeña un rol importante en la transmisión de datos. Cada tipo de pulso se utiliza dependiendo de los requerimientos de la

red. Por ejemplo si se desea transmitir solitones ópticos se debe utilizar pulsos ópticos secantes.

- Los efectos de SPM pueden ayudar a mejorar el rendimiento de la transmisión, pues éstos ayudan a compensar la dispersión en la fibra, lo cual se logra cuando se trabaja en el régimen de dispersión normal, es decir, cuando el parámetro $\beta_2$ es mayor que cero. Hoy en día existen compensadores de dispersión cromática que se introducen en equipos de transmisión por ejemplo en equipos multiplexores DWDM, donde se requieren para evitar interferencia entre los datos transmitidos.

- La frecuencia está relacionada con la longitud de onda de la señal transmitida. El ensanchamiento debido a GVD se debe a que dichas componentes de frecuencia viajan a diferentes velocidades.

- Las fuentes LED, por la naturaleza de su emisión aleatoria y no controlada, generan niveles de potencia lumínica reducida, del orden de micro watios, por lo que son usadas para distancias cortas y con fibras multimodo. Al observar los ejemplos prácticos se nota que a una potencia de $2\,mW$, que bien podría ser generada por una fuente LED, los efectos de SPM no tienen influencia en la transmisión. Por lo tanto se concluye que las fuentes LED por su bajo nivel de potencia no generan el efecto (*Self Phase Modulation*) en la transmisión de la luz que inyectan, más aun si la fibra que la propaga es multimodo, puesto que la sección transversal del núcleo de estas fibras es muy grande, así como también su atenuación.

- En el caso del parámetro no lineal, éste depende de muchos factores, entre ellos de la frecuencia central, la cual a su vez depende de la longitud de onda en la que se trabaja; por lo que se concluye que si se trabaja en ventanas de transmisión de menor longitud de onda, este parámetro aumentará haciendo

que la longitud no lineal disminuya y se produzca el efecto de SPM con mayor incidencia. Es por esto que trabajar con ventanas de transmisión mayores disminuye el efecto de SPM.

- En este estudio, el diámetro del campo modal de la fibra óptica monomodo SSMF es el de mayor valor a diferencia de los otros dos tipos de fibras (DSF y NZ-DSF), es por esta razón que los efectos de SPM son los menores. En la fibra SSMF mientras mayor es el valor del diámetro del campo modal, menor es el efecto de SPM. El valor del diámetro del campo modal lo define cada fabricante.

- Cuando la potencia aumenta, la longitud no lineal disminuye, por lo que los efectos de SPM deberán ser tomados en consideración. Si a este efecto se suma una alta velocidad de transmisión, los pulsos ópticos se verán también afectados por el efecto dispersivos.

- Cuando se transmite con una potencia alta y con una velocidad de transmisión también alta, la señal se degrada rápidamente, ya que en primer lugar en el dominio del tiempo los pulsos se sobreponen y existe ISI (*Inter SymbolInterference*); mientras que en el dominio de la frecuencia existe interferencia entre canales de diferente frecuencia.

- Para evitar que SPM tenga impacto en la transmisión se debe incorporar atenuadores ópticos en la salida de la fuente óptica, esto atenuará la potencia hasta que se sobrepase la longitud efectiva, a partir de ella se pueden colocar amplificadores ópticos de ganancia limitada para compensar la pérdida provocada originalmente.

- Las fibras ópticas monomodo SSMF son las que mejor respuesta presentan ante los efectos de SPM, esto se debea que sonlas fibras ópticas con mayor

diámetro del campo modal. En la actualidad existen fibras ópticas monomodo NZ-DSF de área extendida las cuales ayudan a mejorar la respuesta ante los efectos de SPM, esto se debe a su área efectiva y a las longitudes de onda de trabajo (alrededor de 1550nm).

- La longitud de dispersión depende exclusivamente de la velocidad de transmisión y del coeficiente de dispersión de segundo orden.

- El valor de la longitud no lineal depende del tipo de fibra monomodo que se utiliza, ya que dicha longitud depende del coeficiente no lineal, el cual relaciona la longitud de onda de trabajo de la fibra, la longitud efectiva (dependiente del coeficiente de atenuación de cada fibra óptica), el área efectiva (relacionado al diámetro del núcleo) y la potencia de transmisión.

- La fibra óptica monomodo SSMF es la que mayor valor de longitud no lineal presenta, esto se debe a que tiene la mayorárea efectiva en comparación a las fibras DSF y NZ-DSF,por esta razón esta fibra presenta una buena respuesta ante los efectos de SPM.

- El valor del coeficiente no lineal calculado en la fibra SSMF es el más bajo a diferencia de los obtenidos en las fibras DSF y NZ-DSF. Es por esta razón que estas fibras son las que mejor respuesta tiene ante los efectos de SPM.

- Una posible solución para evitar la aparición de fenómenos no-lineales es utilizar fibras con un área efectiva de núcleo muy grande de forma que la potencia se distribuya en una mayor superficie reduciendo la intensidad en cualquier punto del núcleo. Para constatar lo mencionado se hace referencia a la ecuación (Ec 1.16) donde se puede observar claramente que si el área efectiva de la fibra óptica se incrementa, la no linealidad de la fibra disminuye; haciendo posible una transmisión con menor efecto de SPM, es por esto que hoy en día se fabrican fibras NZ DSF de gran área efectiva, que son menos propensas a efectos no lineales tales como SPM.

- El software NLSE Solver se basa en la ecuación no lineal de Schrödinger, dicha ecuación indica la evolución del pulso con el pasar del tiempo. En sus cálculos involucra los parámetros mencionados en el segundo y tercer capítulo, como es el caso de la potencia de transmisión, los coeficientes de dispersión de segundo y tercer orden, el coeficiente no lineal y el coeficiente de atenuación. Por lo que su uso es adecuado para la simulación de los efectos provocados por SPM.

- A medida que el coeficiente de dispersión de tercer orden tiende a cero, existen mayor número de armónicos sobre la frecuencia central del pulso. Estos armónicos son de diferentes magnitudes y no presentan simetría respecto a la frecuencia central.

- En la actualidad existen fibras ópticas monomodo NZ-DSF con áreas efectivas del campo modal mayores que las SSMF, por lo que en estas fibras los efectos de SPM son menores. Es por esto que sería erróneo afirmar que solo las fibras ópticas monomodo SSMF presentan la mejor respuesta ante los efectos de SPM.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- En el desarrollo de este estudio se recomienda en primer lugar analizar los otros efectos no lineales, para así saber escoger bien los parámetros iniciales de transmisión y tratar de atenuar en su mayoría los efectos que éstos producen.

- Se recomienda realizar el estudio adecuado de la interacción de los efectos lineales como son la dispersión modal y la dispersión cromática con los otros efectos no lineales para observar cuál de todos los efectos no lineales producen mayor degradación de la señal.

- Se sugiere realizar el estudio de los efectos no lineales en una transmisión DWDM que es una de las técnicas de multiplexación más usadas hoy en día en sistemas de comunicaciones ópticas.

- Se debería realizar el estudio de los solitones ópticos que por lo visto es una forma adecuada de mantener los bits íntegros a lo largo de la transmisión. En este caso igualmente intervienen los factores de SPM y de GVD.

- Se recomienda observar el efecto que tiene SPM explícitamente en los sistemas DWDM para determinar la degradación que sufren los pulsos en estos sistemas ópticos.

# BIBLIOGRAFÍA

## Referida de textos:

[1] DÍAZ DE LA IGLESIA, R., 1985, “Comunicaciones por Fibra Óptica –Manual de Ingeniería”, Marcombo-Boixareu Editores.

[3] MARTIN, José “Sistemas de Redes Ópticas de Comunicaciones”, Edición 2004. Editorial Isabel Capella

[5] AGRAWAL Govind, Efectos no lineales de Fibra Óptica, 3ra edición, Año 2001

[11] ALBELLA, José, OPTOELECTRÓNICA Y COMUNICACIÓN ÓPTICA, Año 1988, Pág. 123

[13] BIANCHI Carlos, Guías de Onda Ópticas. PDF Año 2003

[14] TELNET - Fibras ópticas para NGN – Dispersión Cromática y PMD – Noviembre 2009

[15] LEIVA Ariel, Efectos de la Dispersión de modo de polarización, Tercera edición, Año 2007

[26] GROSZ, D., 2003, “Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de alta capacidad”, Buenos Aires, Argentina, Año 2003

[33] ABELLAN Daniel, Sistema de comunicaciones ópticos, Año 2007

[35] ORTEGA Beatriz, Redes Ópticas, Año 2007

## Referida de páginas web:

[2] www.lafibraopticaperu.com/fabricacion-y-materiales-de-la-fibra-optica/

[4] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/Electromagnetic_spectrum

[6] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/63/Refraccion

[7] www.fibraopticahoy.com

[8] http://redescableadas.wordpress.com/2012/03/22/la-fibra-optica/

[9] www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/.../IntroduFO2.pdf

[10] http://ramcir_cjm.tripod.com/Mvg3.htm

[12] http://www.ebosa.co.cl/Tecnico/tecnolog.htm

[16] http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479786854.pdf

[17] www.itu.int/rec/T-REC-G.652/es

[18] http://fortiz.8k.com/ConceptosBasicos/Tema07-DispersionDesplazada.htm

[20] www.itu.int/rec/T-REC-G.653/es

[21] www.itu.int/rec/T-REC-G.653/recomendation

[22] www.itu.int/rec/T-REC-G.654/es

[23] www.itu.int/rec/T-REC-G.654/recomendation

[24] www.itu.int/rec/T-REC-G.655/es

[25] www.itu.int/rec/T-REC-G.656/es

[27] http://biblioteca.ucm.es/tesis/fis/ucm-t29271.pdf

[28] http://lafibraopticaperu.com/fibra-monomodo-de-dispersion-desplazada

[29] http://cursoslibres.academica.mx/236/tecnologia-gpon/GPON.swf

[30] http://www.corning.com/docs/opticalfiber/pi1463.pdf

[31] http://communications.draka.com/sites/usa/USDatasheets/SMF-NZDSF-LA-LWP.pdf

[32] http://gaem.tlc.unipr.it/gestione/userfiles/File/Cucinotta/datasheet_LEAF.pdf

[34] http://delibes.tel.uva.es/tutorial/Tema_I/No_lineal/No_lineal.html#applet3

[36] http://www.icfo.eu/images/publications/MT04-001.pdf

## Referencia de Tesis

[19] CECILIANO Alvaro, Mediciones de Transmisión en Fibras Ópticas con Fuentes Colimadas y No Colimadas, Diciembre 2006.

# GLOSARIO

**ANCHO DE BANDA:** Es la longitud, medida en Hertz del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor cantidad de la potencia de la señal transmitida. Además es dentro del rango de frecuencias en el cual se puede transmitir la información.

**CANAL DE FRECUENCIA:** Es una fracción de frecuencia determinada sobre la cual se transmite determinada información. Por lo general a cada cliente se le asigna un canal de frecuencia diferente.

**DCF (*Dispersion Compensating Fiber)*:** Son aquellas fibras que se caracterizan por poseer un parámetro de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de las fibras convencionales utilizadas en la transmisión.

**DIODOS LED:** Es un tipo especial de diodo, que trabaja como un diodo común, pero éste emite luz una vez que ha sido atravesado por corriente eléctrica.

**DISTORSIÓN:** Se define a la distorsión como la deformación de la señal una vez que ha atravesado un determinado sistema. En los sistemas ópticos la distorsión toma el nombre de aberración.

**DWDM (*Dense WavelengthDivisionMultiplexing)*:**Es una técnica de Multiplexación utilizada en fibras ópticas cuando se trabaja en la banda C (1550 nm). Cada portadora óptica forma un canal independiente dentro de una misma fibra óptica.

**ECUACIONES DE MAXWELL:** Son el conjunto de cuatro ecuaciones que describen por completo el comportamiento electromagnético de una onda.

**ESPECTRO DE FRECUENCIAS:** El espectro de frecuencias se las asocia a cualquier concepto relacionado con frecuencias. El espectro de frecuencias va desde ELF (frecuencias extremadamente bajas) hasta los rayos cósmicos.

**FOTO-TRANSMISOR:** En los sistemas ópticos, es aquel que transmite las portadoras en forma de haces luminosos. Generalmente en la transmisión óptica se utilizan los láseres o los diodos LED.

**FOTORECEPTOR:** El detector convierte la señal óptica que precede de la fibra en señal eléctrica, luego ésta se regenera para llevarla al equipo terminal o para ser incorporada a la siguiente etapa de un repetidor óptico.

**FRECUENCIA DE RESONANCIA:** Todo sistema posee frecuencias características, cuando este sistema se excita sobre una de estas frecuencias, se produce una vibración. Estas vibraciones ocasionan que las frecuencias del sistema entren en resonancia.

**INTERFERENCIA:** Se define a la interferencia como una señal de naturaleza no deseada. En comunicaciones un ejemplo de interferencia es la diafonía.

**LÁSER *(light amplificationby Stimulated emission of radiation)*:** El láser es un dispositivo que se utiliza para transmitir la información digital. Tiene una emisión siempre coherente (no tienen desfases, es decir, son señales puras).

**LONGITUD DE ONDA:** Se define como el periodo espacial de la misma, es decir, la distancia existente entre pulso y pulso consecutivos que contienen la misma fase.

**REFLEXIÓN:** Se define a la reflexión como el cambio de dirección de un rayo incidente sobre la separación existente entre dos medios físicos, de tal forma que regresa a la forma inicial. Por ejemplo la reflexión de la luz, el sonido y las ondas en el agua.

**REFRACCIÓN:**La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos.

**SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICO:** Es aquel sistema en el cual todos sus componentes son de carácter óptico; es decir, el transmisor, el receptor, el medio de transmisión y la señal, todo es óptico.

**SOLITÓN ÓPTICO:**Un solitón es básicamente, un pulso que sigue una determinada ecuación matemática, de modo que se consigue mediante una forma especial, que la atenuación y dispersión que introducen la fibra óptica se auto-compensen, consiguiendo mantener su forma invariable a lo largo del tiempo, y consiguiendo así aumentar la distancia de transmisión. Se utilizan para canales de 10 Gbps o superiores.

**VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN:** La velocidad de transmisión es la relación entre la información transmitida a través de una red de comunicaciones y el tiempo empleado para ello. A su vez es la inversa del tiempo de bit utilizado en la transmisión.

# ANEXOS

# ANEXO 1

# ÁREA EFECTIVA DEL CAMPO MODAL [17]

Effective area is a parameter that is closely related to optical fibre non-linearities that will affect the transmission quality of the optical fibre systems, especially in long-haul optically amplified systems.

Effective area $A_{eff}$ is defined as follows:

$$A_{eff} = \frac{2\pi\left[\int_0^\infty I(r)\,r\,dr\right]^2}{\int_0^\infty I(r)^2\,r\,dr} \qquad \text{(II-1)}$$

where $I(r)$ is the field intensity distribution of the fundamental mode of the fibre at radius $r$. The integration of equation II-1 is carried out over the entire cross-sectional area of the fibre. For example, if we make a Gaussian approximation such that:

$$I(r) = \exp\left(-2r^2/w^2\right) \qquad \text{(II-2)}$$

where $2w$ is the mode field diameter (MFD), then equation II-1 can be analytically integrated and gives:

$$A_{eff} = \pi w^2 \qquad \text{(II-3)}$$

The Gaussian approximation is accurate for [b-ITU-T G.652] and [b-ITU-T G.654] step-index fibres near the $LP_{11}$ cut-off, but for G.652 and G.654 fibres at much longer wavelengths, and in the case of [b-ITU-T G.653] dispersion shifted fibres, $A_{eff}$ cannot be accurately estimated from equation II-3.

A more general but empirical relationship between $A_{eff}$ and $w$ is[1]:

$$A_{eff} = k\pi w^2 \qquad \text{(II-4)}$$

where $k$ is a correction factor.

### II.3 Correction factor *k*

In the experiment, the mode field diameter (MFD) was measured by the variable aperture test method. From the far-field pattern (FFP) of the output optical power $P(r)$, it was then possible to calculate the near-field pattern (NFP) using an inverse Hankel transformation. $A_{eff}$ is then derived from the NFP by using equation II-1.

The correction factor $k$ in equation II-4 depends on the wavelength and on fibre parameters such as refractive index profiles, MFD and zero-dispersion wavelength.

**Table II.1 – Summary of correction factor $k$ of $A_{eff}$ and MFD (= 2W) for G.652, G.653 and G.654 fibres based on the examples in Figure II.2**

| Fibre types | Wavelength λ | |
|---|---|---|
| | ~ 1310 nm | ~ 1550 nm |
| ITU-T Rec. G.652 | 0.970 ~ 0.980 (Note) | 0.960 ~ 0.970 |
| ITU-T Rec. G.654 | ... | 0.975 ~ 0.985 (Note) |
| ITU-T Rec. G.653 | 0.940 ~ 0.950 | 0.950 ~ 0.960 (Note) |
| NOTE – Optimum wavelength region. | | |

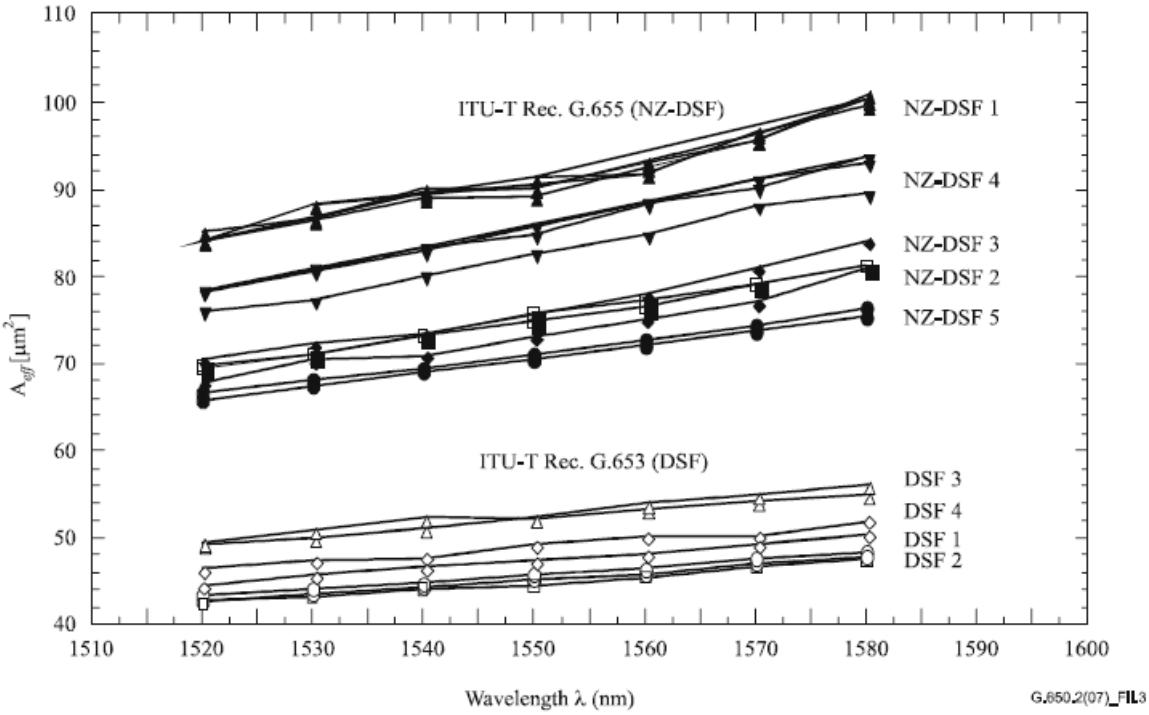



**Figure II.3 – Example of measured λ dependence of $A_{eff}$ for G.653 and G.655 fibres**

# ANEXO 2

## ECUACIÓN NO LINEAL DE SCHRÖDINGER [4] [13]

En física teórica, la ecuación de Schrödinger no lineal (NLS) es una ecuación diferencial en derivadas parciales no lineales. Se trata de una ecuación de campo clásico con aplicaciones en óptica y ondas. A diferencia de la ecuación de Schrödinger, nunca se describe la evolución temporal de un estado cuántico.

La ecuación no lineal de Schrödinger se ha usado modelo para la propagación de la envolvente de unpaquete de ondas en un medio dispersivo y débilmente no lineal, y ha encontrado muchasaplicaciones en el campo de la física, p.ej., la propagación de ondas de gravedad en aguas profundas en mecánica de fluidos, la propagación de ondas de tipo Langmuir en física deplasmas y el auto-enfoque y la auto-modulación de trenes de ondas monocromáticas en óptica no lineal.

El gran número de aplicaciones de la ecuación NLS tiene una justificación analítica ya que para casi todas las ecuaciones de evolución caracterizadas por una parte lineal, de tipo “dispersivo" y una parte no lineal que sea “analítica" se obtiene asintóticamente la ecuación NLS cuando se estudia la modulación de una ondaportadora debida a efectos no lineales débiles.

La ecuación no lineal de Schrödinger es la siguiente:

$$i\partial_t\psi = -\frac{1}{2}\partial_x^2\psi + \kappa|\psi|^2\psi$$

Donde:

$\Psi$: representa el campo que depende de la posición y del tiempo $\Psi = f(x,t)$.

En óptica, la ecuación de Schrödinger no lineal se produce en el sistema Manakov, un modelo de propagación de la onda en la fibra óptica. La función ψ representa una onda y la ecuación de Schrödinger no lineal describe la propagación de la onda a través de un medio no lineal. La derivada de segundo orden representa la dispersión, mientras que los términosmayores representan la no linealidad. Le ecuación sirve para modelar y encontrar soluciones a los efectos no lineales que se producen en una propagación de ondas luminosas, tales son, la automodulación de fase, mezcla de cuatro ondas, generación de segundo armónico y la dispersión estimulada de Raman.

# ANEXO 3

# TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO SSMF Y NZ-DSF [30] [31] [32]

**Fibras NZ-DSF con un Área Efectiva Extendida**: Debido a que los fenómenos no lineales se manifiestan a causa de que el campo modal está muy concentrado en un área pequeña, las fibras de nueva generación aumentan el área efectiva de las fibras NZ-DSF convencionales para disminuir este efecto. El área efectiva en una fibra óptica NZ-DSF tradicional es de 50 a 60 μm². En las fibras de nueva generación con área efectiva extendida, el valor de este parámetro esta entre 70 μm² y 110 μm² con valores típicos de 72 μm². Sin embargo el área efectiva extendida no puede aumentar en forma excesiva ya que se debe mantener la condición monomodo de la fibra. El área efectiva extendida permite entonces disminuir el pico de potencia que la fibra óptica debe soportar disminuyendo de forma importante el fenómeno de mezcla de cuatro ondas, FWM.

La siguiente tabla indica las características de ambas fibras ópticas monomodo NZ-DSF:

| Característica | Tipo de fibra monomodo | |
|---|---|---|
| | NZDSF-LS (TM-11, TM-12) | NZDSF-LEAF (TM-13, TM-14, TM-15, TM-16) |
| Dispersión | -01 a -3.5 ps/nm-Km sobre un rango de 1530 a 1560 nm. | 2 a 6 ps/nm-Km para el rango de 1530 a 1565 nm.<br>4.5 a 11.2 ps/nm-Km para el rango de 1565 a 1625 nm<br>-17.4 ps/nm-Km a 1310 nm |
| Área efectiva | 55 $\mu m^2$ | 72 $\mu m^2$ |
| Atenuación a 1310 nm | 0.36 dB/Km | ≤0.34 dB/Km |
| Atenuación a 1550 nm | < 0.25 dB/Km | ≤0.25 dB/Km<br>≤0.25 dB/Km a 1625 nm |
| Diámetro de modo de propagación a 1310 nm | | 6.67 $\mu m$ |
| Diámetro de modo de propagación a 1550 nm | 8.4 $\mu m$ | 9.2 a 10 $\mu m$ |
| Longitud de onda de dispersión cero | diferente de 1550 | diferente de 1550 |
| PMD en fibra | 0.2 $ps/\sqrt{Km}$ Max.<br>0.08 $ps/\sqrt{Km}$ Enlace | 0.5 $ps/\sqrt{Km}$ Max. |

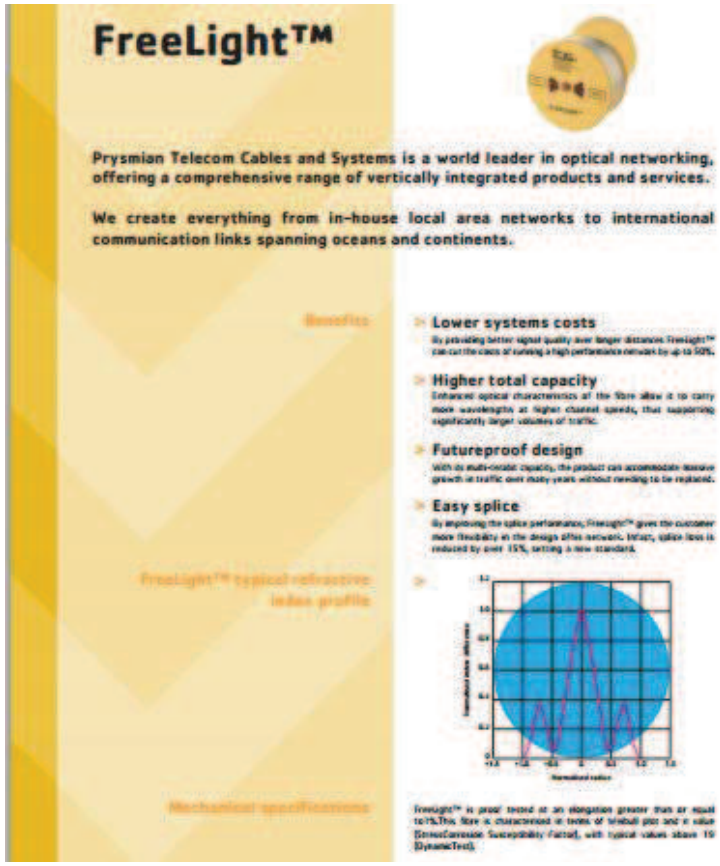
*Tabla 1.3 características de Fibra NZDSF-LS y LEAF*

La siguiente tabla indica las características de ambas fibras ópticas monomodo SMF:

| Característica | Tipo de fibra monomodo | |
|---|---|---|
| | SMF-28 (TM-1, TM-3, TM-4, TM-6) | SMF/DS (TM-5, TM-7, TM-8, TM-10) |
| Dispersión | 18 ps/nm·Km | 5 ps/nm·Km |
| Área efectiva | 80 $\mu m^2$ | 55 $\mu m^2$ |
| Atenuación a 1310 nm | < 0.40 dB/Km | < 0.35 dB/Km |
| Atenuación a 1550 nm | < 0.30 dB/Km | < 0.25 dB/Km |
| Diámetro de modo de propagación a 1310 nm | 9.3 $\mu m$ | |
| Diámetro de modo de propagación a 1550 nm | 10.5 $\mu m$ | 8.1 $\mu m$ |
| Longitud de onda de dispersión cero | 1310 | 1550 |
| PMD en fibra | 0.2 ps/$\sqrt{Km}$ Max. 0.1 ps/$\sqrt{Km}$ Enlace | 0.5 ps/$\sqrt{Km}$ Max. |

*Tabla 1.2 Características de las fibras SMF-28 y SMF/DS*

**FIBRA ÓPTICA MONOMODO FREELIGHT – PRYSMIAN**



| Glass geometry | Unit | |
|---|---|---|
| Cladding diameter | µm | 125.0 ± 0.7 |
| Cladding non circularity error | % | ≤ 1.0 |
| Core/cladding concentricity error | µm | ≤ 0.5 |

| Coating geometry | Unit | |
|---|---|---|
| Outer coating diameter | µm | 245 ± 5 |
| Coating/cladding concentricity | µm | ≤ 10 |

**Fibres are characterised both in the Conventional and in the Extended Band for attenuation and chromatic dispersion performances.**

## OPTICAL SPECIFICATIONS

| Attenuation coefficients | Unit | |
|---|---|---|
| @1383 nm | dB/km | ≤1.0 |
| @1550 nm | dB/km | ≤0.23 |
| @1625 nm | dB/km | ≤0.25 |

| Dispersion coefficients | Unit | |
|---|---|---|
| In the range 1530-1565 nm | ps/(nm•km) | 2.0 - 6.0 |
| In the range 1565-1625 nm | ps/(nm•km) | 4.5 - 11.2 |
| Polarisation mode dispersion (PMD | ps/√km | ≤0.1 |
| PMD link design value* | ps/√km | ≤0.04 |

* Link design value definition complies with IEC 61282-3.

| Mode Field Diameter | Unit | |
|---|---|---|
| @1550 nm | µm | 9.6 ± 0.4 |
| Typical effective area (@ 1550 nm) | $\mu m^2$ | 72 |

| Cable cut-off wavelength ($\lambda_{cc}$) | Unit | |
|---|---|---|
| | nm | ≤ 1450 |

**Any questions? Our team of experienced technical staff is ready to talk to you. See contact details.**

PRYSMIAN