

FENÓMENOS LINEALES Y NO LINEALES EN LA TRANSMISIÓN POR
FIBRA ÓPTICA

PLANTEAMIENTO Y SIMULACIÓN



Karla Cecilia Puerto López · Jorge Eliécer Galvis Velandia · Luis Leonardo Camargo Ariza

Fenómenos lineales y no lineales en la transmisión por fibra óptica

Planteamiento y simulación

Karla Cecilia Puerto López

Jorge Eliécer Galvis Velandia

Luis Leonardo Camargo Ariza

Colección Ingeniería y Tecnología

Serie: Ingeniería Electrónica

Puerto López, Karla Cecilia, autor

Fenómenos lineales y no lineales en la transmisión por fibra óptica : planteamiento y simulación / Karla Cecilia Puerto López, Jorge Eliécer Galvis Velandia, Luis Leonardo Camargo Ariza. -- Santa Marta : Editorial Unimagdalena, 2024.

1 recurso en línea : archivo de texto: PDF. -- (Ingeniería y Tecnología. Ingeniería Electrónica)

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-746-776-5 (pdf)

1. Fibra óptica 2. Comunicación por fibra óptica 3. Óptica geométrica 4. Sistemas de transmisión de datos I. Galvis Velandia, Jorge Eliécer, autor II. Camargo Ariza, Luis Leonardo, autor

CDD: 621.38275 ed. 23

CO-BoBN- 00139

Primera edición, septiembre de 2024

2024 © Universidad del Magdalena. Derechos Reservados.

Editorial Unimagdalena

Calle 29H3 n.º 22-01

Edificio de Innovación y Emprendimiento

(57 - 605) 4381000 Ext. 1888

Santa Marta D.T.C.H. - Colombia

editorial@unimagdalena.edu.co

<https://editorial.unimagdalena.edu.co/>

Colección Ingeniería y Tecnología, serie: Ingeniería Electrónica

Rector: Pablo Vera Salazar

Vicerrector de Investigación: Jorge Enrique Elías-Caro

Diseño editorial: Luis Felipe Márquez Lora

Diagramación: Eduard Hernández Rodríguez

Diseño de portada: Andrés Felipe Moreno Toro

Corrección de estilo: Juan Diego Mican González

Santa Marta, Colombia, 2024

ISBN: 978-958-746-776-5 (pdf)

DOI: <https://doi.org/10.21676/9789587467765>

La UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA, en su calidad de editora y titular de derechos patrimoniales de autor, y en su propósito de contribuir con la difusión y divulgación del conocimiento, la producción intelectual y la educación, dispone autorizar la reproducción impresa o digital del presente libro, de manera total o parcial, así como su distribución, difusión o comunicación pública (puesta a disposición) en medio impreso o digital de manera libre y gratuita, en tanto se mantenga la integridad del texto y se dé la correspondiente cita a sus autores y mención institucional. Queda prohibida la comercialización o venta a cualquier título de este material.



Las opiniones expresadas en esta obra son responsabilidad de los autores y no compromete al pensamiento institucional de la Universidad del Magdalena, ni genera responsabilidad frente a terceros.

Contenido

Introducción.....	9
Lista de abreviaciones.....	12
Lista de nomenclaturas.....	14
Capítulo 1. Conceptos básicos sobre transmisión por fibra óptica.....	17
1.1. Fibra óptica	17
1.2. Beneficios de la transmisión por fibra óptica	18
1.3. Tipos de fibra óptica	18
1.4. Espectro electromagnético	19
1.4.1. International Telecommunication Union (ITU)	21
1.5. Tipos de ruido en la fibra óptica.....	22
1.6. Pulso gaussiano.....	22
1.7. Ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE)	23
1.8. Modulación On-Off Keying (OOK)	24
1.9. MainOptik Simulator.....	25
1.10. Ejercicios resueltos	26
1.11. Ejercicios propuestos	28
Capítulo 2. Óptica geométrica.....	29
2.1. Índice de refracción	29
2.2. Ley de reflexión total.....	29
2.3. Ley de refracción	30
2.3.1. Relación de la ley de refracción con la transmisión por fibra óptica.....	31
2.4. Ángulo crítico	31
2.5. Ángulo de aceptación máxima y apertura numérica	31
2.6. Ejercicios resueltos	33
2.7. Simulación en MainOptik Simulator.....	35
2.8. Ejercicios propuestos	37

Capítulo 3. Atenuación y dispersión cromática en la fibra óptica.....	38
3.1. Atenuación en la fibra óptica.....	38
3.1.1. Fuentes de pérdida de potencia en sistemas ópticos	40
3.1.2. Ejercicios resueltos de atenuación.....	41
3.1.3. Simulación de atenuación en MainOptik Simulator.....	43
3.2. Dispersión en la fibra óptica	45
3.2.1. Función de propagación de onda $\beta(\omega)$	45
3.2.2. Dispersión cromática $D(\lambda)$ y pendiente de dispersión $S(\lambda)$	46
3.2.3. Efectos dispersivos en el dominio del tiempo	47
3.2.4. Efectos dispersivos en el dominio de la frecuencia	48
3.2.5. Ejercicios resueltos de dispersión.....	48
3.2.6. Simulación de dispersión en MainOptik Simulator.....	51
3.3. Ejercicios propuestos	52
 Capítulo 4. Automodulación de fase (SPM).....	 54
4.1. Efecto Kerr eléctrico-óptico	54
4.2. Efecto SPM en el dominio del tiempo	55
4.3. Efecto SPM en el dominio de la frecuencia.....	57
4.4. Cambio de frecuencia $\Delta\omega$	63
4.5. Ejercicios resueltos de SPM	64
4.6. Simulación del efecto SPM en MainOptik Simulator.....	70
4.7. Ejercicios propuestos	72
 Capítulo 5. Mezcla de cuarta onda y evaluación de sistemas ópticos.....	 75
5.1. Mezcla de cuarta onda (FWM).....	75
5.2. Relación señal a ruido óptico (OSNR).....	78
5.3. Criterio de potencia de entrada para evitar SPM	79
5.4. Ejercicios resueltos de FWM	79
5.5. Simulación del efecto FWM en MainOptik Simulator.....	84
5.6. Ejercicios propuestos	88
 Referencias.....	 91

Lista de tablas

Tabla 1. Distribución de energía electromagnética definida por la ITU.....	21
Tabla 2. Resultados para el primer escenario de comunicación	36
Tabla 3. Resultados de la atenuación para el escenario de comunicación	45
Tabla 4. Valores típicos de dispersión cromática.....	46
Tabla 5. Resultados de la dispersión cromática para el escenario de comunicación.....	52
Tabla 6. Resultados de SPM para el escenario de comunicación	72
Tabla 7. Resultados de FWM para el escenario de comunicación.....	88

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de la composición típica de un enlace de fibra óptica.....	18
Figura 2. Clasificación de los tipos de enlaces de fibra óptica según su modo de propagación.....	19
Figura 3. Espectro electromagnético en función de la longitud de onda y de la frecuencia....	20
Figura 4. Pulso gaussiano en el dominio del tiempo	23
Figura 5. Logotipo del programa MainOptik Simulator.....	26
Figura 6. Representación de la ley de reflexión total	30
Figura 7. Representación de la ley de refracción total.....	30
Figura 8. Representación del escenario de comunicación considerado para el cálculo de θ_{am} y AN	32
Figura 9. Módulo de óptica geométrica en MainOptik Simulator para el primer escenario	35
Figura 10. Módulo de óptica geométrica en MainOptik Simulator para el segundo escenario, donde no es posible la transmisión de datos.....	37
Figura 11. Propagación de pulsos gaussianos a lo largo de un enlace de fibra óptica en función del tiempo y de la distancia.....	39
Figura 12. Variación de la potencia óptica del pulso gaussiano propagado a través de la fibra óptica en función de la longitud del enlace.....	40
Figura 13. Módulo de atenuación en MainOptik Simulator para el escenario de atenuación	44
Figura 14. Dispersión cromática en la fibra óptica.....	47
Figura 15. Módulo de dispersión en MainOptik Simulator para el escenario de comunicación	51
Figura 16. Propagación de pulsos de luz en el dominio del tiempo bajo efectos de atenuación, dispersión y SPM.....	57
Figura 17. Propagación de pulsos de luz en el dominio de la frecuencia bajo efectos de atenuación, dispersión y SPM.....	61
Figura 18. Magnitud y fase de una señal gaussiana transmitida a lo largo de un enlace de fibra óptica bajo los efectos de SPM	62
Figura 19. Cambio de frecuencia debido a SPM para un pulso gaussiano	64
Figura 20. Módulo de SPM en MainOptik Simulator para el escenario de comunicación.....	71

Figura 21. Fenómeno FWM en el dominio de la longitud de onda	77
Figura 22. Fenómeno FWM para un pulso gaussiano	78
Figura 23. Módulo de FWM en MainOptik Simulator para el escenario de comunicación...	85
Figura 24. Gráfica de armónicos generados por FWM en MainOptik Simulator.....	86
Figura 25. Gráfica del efecto FWM en la propagación de pulsos gaussianos en sistema WDM en MainOptik Simulator	87

Introducción

La fibra óptica es utilizada frecuentemente en los sistemas de telecomunicaciones como medio de transmisión por sus características de baja atenuación, gran ancho de banda y resistencia a la interferencia y a la intersección. Estas propiedades le dan a la fibra óptica una ventaja en términos de capacidad y confiabilidad sobre medios como el cable coaxial o el par de cobre.

En la transmisión por fibra óptica se presentan fenómenos lineales y no lineales debido a su construcción, las propiedades intrínsecas de los materiales empleados y sus modos de operación o propagación de la luz. Estudiar y comprender estos comportamientos facilita la selección del tipo de fibra requerido, la optimización de la capacidad de la fibra óptica elegida, la mitigación de los efectos adversos y la innovación en la construcción de nuevas fibras y formas de uso del medio. Por lo tanto, en este libro se introducen los fundamentos sobre los fenómenos lineales y no lineales más significativos que se dan en las transmisiones de datos por fibra óptica y, en particular, se orienta al análisis del caso específico de un haz de luz que se comporta como un pulso gaussiano.

En la literatura especializada existe un amplio conjunto de textos relacionados con la temática que abordan las comunicaciones ópticas desde una orientación netamente teórica, con conceptos físicos abstractos y apartados matemáticos complejos, pero muchas veces carentes de una visión práctica enfocada a la ingeniería. Por tal razón, en este libro se agrupan y presentan de forma práctica los principales fenómenos que deben tenerse en cuenta cuando se emplean las fibras ópticas. Se ofrece entonces un texto corto, escrito en un lenguaje sencillo, con conceptos y aplicaciones puntuales, que utiliza como apoyo una herramienta computacional libre que le permite al usuario agilizar los cálculos matemáticos y la creación de gráficos, de tal forma pueda concentrarse en la interpretación y aplicación de los resultados de los ejemplos y los problemas que se incluyen.

Esta publicación está dirigida a estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Telecomunicaciones y carreras afines. Este gran alcance se debe a que las comunicaciones ópticas están tomando un papel fundamental en la cotidianidad de las personas, de forma que el uso de la fibra óptica ya no se limita a las redes troncales de comunicación, sino que se ha esparcido hasta los hogares en las redes de distribución de los servicios de telecomunicaciones comunes como televisión, internet, teléfono y otros. Es por esta razón que muchos programas de ingeniería incorporan en sus planes de estudios asignaturas obligatorias u optativas que abordan total o parcialmente el estudio de este medio de transmisión. Adicionalmente, el libro está alineado para facilitar el cumplimiento del resultado de aprendizaje para los programas de Ingeniería definido por ABET (2021): «capacidad para identificar, formular y resolver problemas complejos de ingeniería aplicando principios de ingeniería, la ciencia y las matemáticas» (p. 8), el cual de hecho se encuentra establecido dentro de la mayoría de los programas de ingeniería.

El propósito del libro es servir como material de apoyo didáctico para introducir y afianzar los conceptos teóricos y prácticos sobre los fenómenos lineales de atenuación y dispersión y de los fenómenos no lineales de auto modulación de fase y mezcla de cuatro ondas. Asimismo, esta obra se articula con un enfoque pedagógico constructivista, donde el estudiante construye su aprendizaje mediante la lectura y el uso de herramientas tecnológicas para resolver una problemática, mientras el docente se desempeña como un facilitador del proceso.

Se recomienda que el libro sea utilizado en compañía del software MainOptik. Esta herramienta fue desarrollada por algunos autores de la obra y es un simulador para comunicaciones ópticas basado en el lenguaje de programación de licencia abierta Python y el constructor visual QtDesigner. Se debe ingresar al enlace <https://jorgegalvisvelandia.blogspot.com/2024/04/mainoptiksimulator.html> para descargar y posteriormente instalar y ejecutar esta interfaz.

La temática del libro se estructura en cinco capítulos. En cada uno se presentan una síntesis teórica, ejercicios solucionados analíticamente y propuestos para los lectores y resultados de simulaciones de casos prácticos haciendo uso de MainOptik. El texto también cuenta con una lista de abreviaturas y nomenclaturas que agilizan la comprensión del lenguaje técnico utilizado en las comunicaciones ópticas.

En el capítulo uno se abordan las definiciones, las generalidades y las características operativas de los enlaces de fibra óptica, considerando su construcción, materiales y regulaciones por parte de las autoridades internacionales y las organizaciones en Colombia. Asimismo, se establece el modelo matemático que se trabajará en los conceptos de las comunicaciones y, finalmente, se presenta el software libre MainOptik.

En el segundo capítulo se profundizan los conceptos de óptica geométrica, repasando las definiciones del índice de refracción, la ley de Snell, entre otros, con el objetivo de reconocer

elementos fundamentales para la transmisión de datos a través de la fibra óptica. Adicionalmente, en esta sección se presenta un modelo de transmisión que le permite al lector calcular los ángulos de incidencia necesarios para comunicaciones satisfactorias.

Luego, en el capítulo tres, se analizan los fenómenos lineales presentes en la transmisión por fibra óptica en el régimen de duración del pulso en nanosegundos. Se analiza la atenuación debida a las características del material, los conectores y los empalmes del sistema, y también se describe la dispersión cromática, abordando la conceptualización matemática para cada fenómeno en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.

En el capítulo cuarto se enuncia la modulación de fase autoinducida. Asimismo, se analiza nuevamente el comportamiento del pulso gaussiano en el tiempo y la frecuencia, pero considerando nuevas variables en el régimen de la duración del pulso en picosegundos. En este caso, se debe tener en cuenta que, si bien interactúan los fenómenos lineales de atenuación y dispersión, esta última depende de nuevos factores que la hacen mucho más sensible y generan alteraciones más drásticas en la señal propagada. También se define y muestra el cambio de fase que presenta el pulso transmitido en estas condiciones.

Por último, en el quinto capítulo, estos fenómenos se condensan en el fenómeno no lineal de mezcla de cuarta onda, el cual es uno de los que más afecta las comunicaciones digitales por fibra óptica en condiciones de alta velocidad y transmisión multicanal. El lector podrá calcular las variables correspondientes para cada armónico generado en el sistema debido a este efecto, y también podrá evaluar la relación señal a ruido, la magnitud del ruido y calcular la condición de potencia que permita disminuir este fenómeno para obtener comunicaciones satisfactorias.

Esperamos que este texto, por su enfoque didáctico, sea de mucha utilidad para profesores y alumnos de un área académica y profesional en constante desarrollo.

Lista de abreviaciones

ANE	Agencia Nacional del Espectro (Colombia)
BW	<i>Band width</i> (ancho de banda)
dB	Decibel
EMI	<i>Electromagnetic interference</i> (interferencia electromagnética)
FWM	<i>Fourth Wave Mixing</i> (mezcla de cuarta onda)
GVD	<i>Group Velocity Delay</i> (retardo por velocidad de grupo)
Hz	Hercio
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
MinTIC	Ministerio de Tecnologías para la Información y las Comunicaciones
NFWM	<i>Noise Fourth Wave Mixing</i> (ruido por mezcla de cuarta onda)
NLSE	<i>Nonlinear Schrödinger Equation</i> (ecuación no lineal de Schrödinger)
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OOK	<i>On-Off Keying</i> (codificación encendido-apagado)

OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i> (relación señal a ruido óptica)
SMF	Single-Mode Optical Fibre (fibra óptica monomodo)
SPM	<i>Self Phase Modulation</i> (modulación de fase autoinducida)
TOD	<i>Third Order Dispersion</i> (dispersión de tercer orden)
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> (multiplexación por división de longitud de onda)

Lista de nomenclaturas

BW	Ancho de banda
T_0	Ancho temporal del pulso de entrada
T_1	Ancho temporal del pulso de salida
θ_c	Ángulo crítico
θ_{am}	Ángulo de aceptación máxima
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_r	Ángulo de refracción
AN	Apertura numérica
A_{eff}	Área efectiva del enlace de fibra óptica
$A(z)$	Atenuación del enlace de fibra en función de la distancia
α_{dB}	Atenuación ocasionada por cada conector
E_{dB}	Atenuación ocasionada por cada empalme
$\alpha_{Total}(dB)$	Atenuación total ocasionada por el número de conectores
$E_{Total}(dB)$	Atenuación total ocasionada por el número de empalmes
$\Delta\phi$	Cambio de frecuencia en SPM

W_m	Campo modal de la fibra óptica
i, j, k	Canales en un sistema FWM
α	Coefficiente de atenuación
γ	Coefficiente de no linealidad
n_2	Coefficiente de refracción no lineal
$D(\lambda)$	Dispersión cromática
b	Eficiencia espectral
η	Eficiencia FWM
d_{ijk}	Factor de degeneración de la fibra óptica
$C_1(z)$	Fenómeno de chirrido (<i>chirp</i>) en función de la distancia
C	Fenómeno de chirrido (<i>chirp</i>) producido en el transmisor
f	Frecuencia
ω	Frecuencia angular
ω_0	Frecuencia angular inicial del sistema
$\beta(\omega)$	Función de propagación de onda
$H(z, \omega)$	Función de transferencia del enlace de fibra óptica
$f(m)$	Función del grado de la función de la función gaussiana
exp	Función exponencial
log	Función logaritmo base 10
sin	Función seno
m	Grado de la función gaussiana
β_2	<i>Group Velocity Delay</i> (retardo por velocidad de grupo)
n	Índice de refracción
n_0	Índice de refracción lineal (en SPM)
ln	Logaritmo natural o neperiano
λ	Longitud de onda
λ_{ijk}	Longitud de onda de cada armónico generado en FWM
$\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k$	Longitud de onda de entrada para cada canal en un sistema WDM
z	Longitud del enlace de fibra óptica
L_{eff}	Longitud efectiva del enlace de fibra óptica
T	Marco de referencia que se mueve con el pulso a v_g

N_A	Número de amplificadores utilizados en el sistema
M	Número de armónicos generados en un sistema WDM en FWM
N	Número de canales en un sistema WDM
Ю	Número de conectores
E	Número de empalmes
e	Número de Euler
$\text{Re}\{\mathcal{K}\}$	Parte real de una función
$S(\lambda)$	Pendiente de dispersión
P_{ijk}	Potencia de cada armónico generado en FWM
P_{in}	Potencia óptica de entrada
P_i, P_j, P_k	Potencia óptica de entrada para cada canal en un sistema WDM
$\mathcal{K}(z, t)$	Pulso gaussiano en el dominio de la frecuencia en el extremo final del enlace
$\mathcal{K}(0, t)$	Pulso gaussiano en el dominio de la frecuencia en el extremo inicial del enlace
$\mathcal{K}(z, t)$	Pulso gaussiano en el dominio del tiempo en el extremo final del enlace
$\mathcal{K}(0, t)$	Pulso gaussiano en el dominio del tiempo en el extremo inicial del enlace
$OSNR_{ijk}$	Relación señal a ruido total en un sistema WDM
$NFWM_{ijk}$	Ruido total por FWM en un sistema WDM
β_3	<i>Third Order Dispersion</i> (dispersión de tercer orden)
t	Tiempo
j	Unidad imaginaria
$ \mathcal{K} $	Valor absoluto de la función
$\Delta\lambda$	Variación del ancho espectral del transmisor
v_g	Velocidad de grupo
c	Velocidad de la luz en el vacío
ν	Frecuencia normalizada

Capítulo 1. Conceptos básicos sobre transmisión por fibra óptica

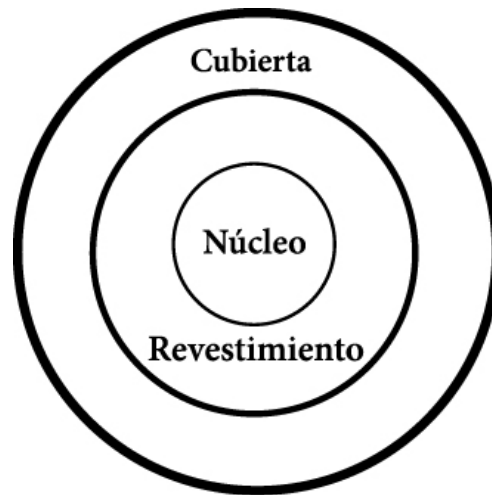
Las comunicaciones por fibra óptica en la actualidad impactan positivamente los diferentes escenarios de transmisión de datos requeridos en cada una de las esferas de la sociedad actual. Así, son un elemento clave del internet de alta velocidad, la instrumentación electrónica orientada a biotecnología, química industrial, espectroscopia o astronomía y, principalmente, las comunicaciones para las tecnologías 4G y 5G, de las cuales la última es la que marca la tendencia actual en la sociedad. A medida que estos avances científicos se popularizan y protagonizan la cotidianidad de los seres humanos, cobra mayor relevancia entender sus conceptos físicos, sus fortalezas técnicas y su potencial para mejorar lo existente y continuar con la innovación en el área (Keiser, 2010).

1.1. Fibra óptica

El enlace de fibra óptica es un medio guiado que transporta los fotones generados por la modulación en pulsos de luz del transmisor, en un proceso típico de transmisión de datos digitales. Existen múltiples configuraciones que varían el tamaño, el diámetro, la longitud y los materiales que constituyen este elemento, las cuales son reguladas y estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) mediante la norma G.652 (11/2016) (ITU-T, 2016).

En términos generales, un enlace de fibra óptica consiste en un *núcleo* compuesto por un material con estructura cristalina, el cual propaga los fotones producidos por el transmisor de la señal. Con base en la óptica geométrica (la cual se detalla más adelante), se utiliza un *revestimiento* con características ópticas distintas a las del núcleo para recubrirlo y *atrapar* los fotones dentro de la guía de onda. A su vez, este revestimiento es envuelto en una cubierta hecha a partir de polímeros que protegen al enlace de fibra del ruido electromagnético y las condiciones del ambiente (Agrawal, 2013). La figura 1 representa la composición típica de un enlace de fibra óptica, con cada una de las capas que la integran.

Figura 1. Esquema de la composición típica de un enlace de fibra óptica



Fuente: elaboración propia.

1.2. Beneficios de la transmisión por fibra óptica

Una de las principales ventajas del uso de la fibra óptica como medio de transmisión radica en el *ancho de banda* (*BW*), que permite transferir un gran volumen de datos. En este caso, dicha variable llega al orden de los terahercios (THz), superando ampliamente el orden de los gigahercios (GHz) que proporcionan los cables de cobre. Por otra parte, para enlaces de fibra con núcleo de silicio, la *atenuación* de la señal (concepto que será profundizado más adelante) es de 0,2 dB/km, mucho menor respecto al cobre, lo que permite enviar señales a largas distancias con un único enlace de fibra óptica.

Otra de las principales ventajas de la fibra óptica que vale la pena resaltar es la inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés). Con este medio, debido a que la composición del enlace se basa únicamente en dieléctricos puros sin componentes metálicos, los campos electromagnéticos no inducen corrientes que interfieran con la comunicación de datos (Keiser, 2010).

1.3. Tipos de fibra óptica

Los enlaces de fibra óptica se pueden clasificar según la composición de su núcleo, el cual se configura de tal forma que los rayos de luz puedan transmitirse efectivamente. Así, si la fibra permite un único modo (haz de luz) de transmisión dentro del núcleo, se considera que es *monomodo*, y se utiliza en comunicaciones de alta velocidad. Por otro lado, se denominan *multimodo* aquellas en las

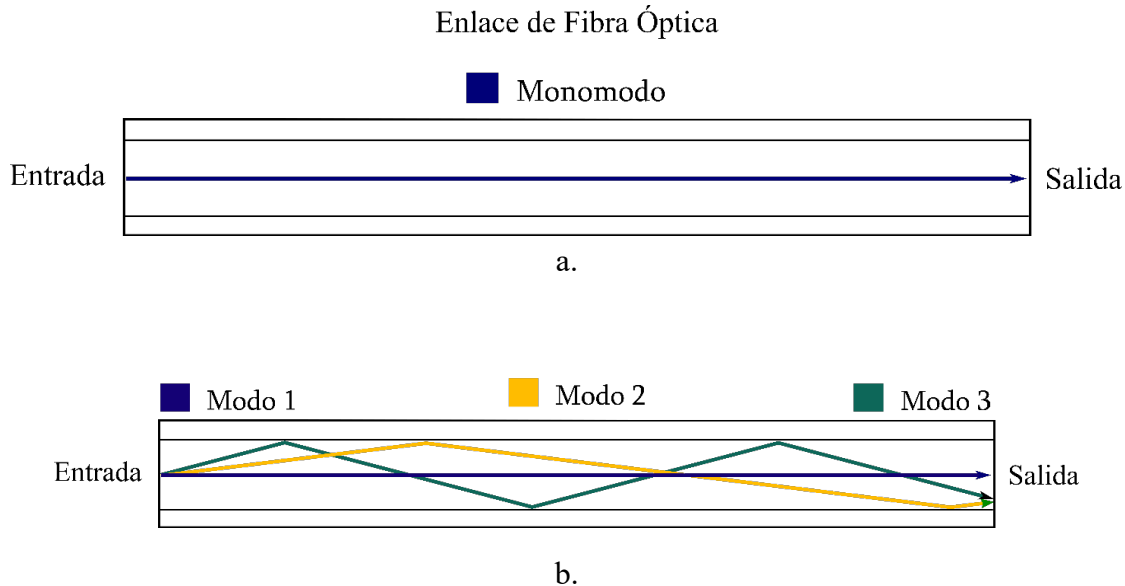
que es posible enviar múltiples rayos por varios caminos dentro del núcleo. En la figura 2 se visualiza el comportamiento del enlace según el tipo de propagación (Keiser, 2010).

Para evaluar si la fibra es monomodo o multimodal, se usa el parámetro adimensional frecuencia normalizada (V), que es inversamente proporcional a la longitud de onda de la fuente óptica de entrada y directamente proporcional al radio del núcleo (a) de la fibra y la apertura numérica (AN) (este último se estudia en detalle en el capítulo siguiente, en la sección 2.5, y depende de los materiales utilizados para construir el núcleo y el revestimiento):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a AN. \quad (1.1)$$

Si el valor de la frecuencia normalizada es inferior a 2,405, se puede decir que la fibra es monomodo ($V \leq 2,405$) y, si es superior, es multimodal ($V > 2,405$).

Figura 2. Clasificación de los tipos de enlaces de fibra óptica según su modo de propagación:
a) enlace monomodo, donde la información se transmite únicamente por un haz de luz; b) enlace multimodo, donde la información se reparte en múltiples haces de luz, con diferente ángulo de disparo, debido a la dispersión cromática



Fuente: elaboración propia.

1.4. Espectro electromagnético

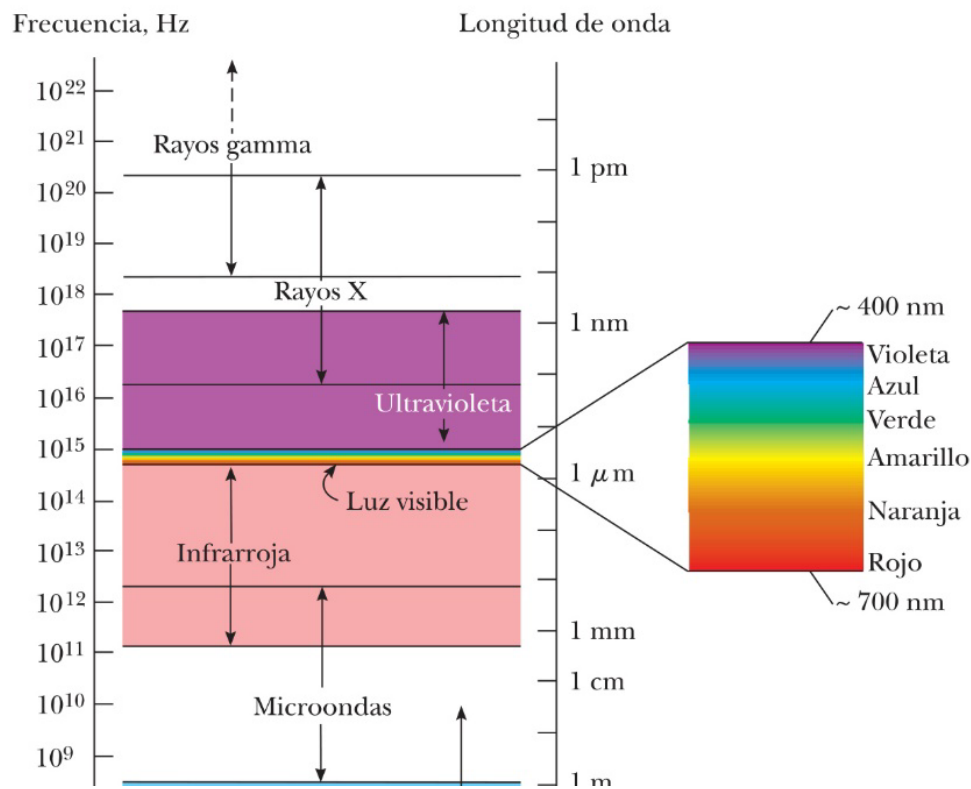
El espectro electromagnético es la distribución energética de los campos electromagnéticos según su *longitud de onda* (λ) y la energía contenida en la onda o la *frecuencia de oscilación* (f)

de esta. En este conjunto se consideran las ondas de radio, las microondas, la luz infrarroja, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. La naturaleza fundamental de toda la radiación dentro de este espectro es que puede considerarse como ondas electromagnéticas que viajan a la *velocidad de la luz* (c) en el vacío. La figura 3 ofrece evidencias sobre la distribución de energía electromagnética en función de la longitud de onda.

Para la transmisión de datos a través de enlaces de fibra óptica se utiliza un rango de longitudes de onda entre 850 nm y 1.550 nm. Estos valores se ubican en la banda de infrarrojo cercano, la cual se selecciona debido a la baja atenuación y dispersión que presentan los enlaces de fibra óptica en este margen, permitiendo la transmisión de datos de ondas portadoras con ancho temporal en el orden de picosegundos a distancias que pueden alcanzar los 100 km con pérdidas de potencia asumibles por dispositivos repetidores.

En este sentido, cabe anotar que, si se usara luz visible, siendo este un campo de investigación emergente, uno de los retos que se enfrentarían es la susceptibilidad a la atenuación y al ruido que poseen las señales en ese margen. De tal manera, el enfoque de modulación y los dispositivos utilizados deberían ser adaptados a estas nuevas condiciones.

Figura 3. Espectro electromagnético en función de la longitud de onda y de la frecuencia



Fuente: Serway y Jewett (2008).

1.4.1. International Telecommunication Union (ITU)

La ITU es una entidad adscrita a la Organización de las Naciones Unidas (ONU) que se encarga de regular a nivel internacional el uso del espectro electromagnético para las diferentes aplicaciones desarrolladas en múltiples industrias, con el objetivo de garantizar la fiabilidad en las comunicaciones por medios guiados y por radiación electromagnética. Cada país posee un organismo adscrito a la ITU para realizar esa labor de control dentro de un territorio determinado. En el caso de Colombia, la Agencia Nacional del Espectro (ANE), creada por el Ministerio de Tecnologías para la Información y las Comunicaciones (MinTIC) bajo sanción de la Ley 1341 (2009), es la encargada de dicho manejo.

Con el objetivo de estandarizar las bandas de frecuencia en función del tipo de comunicación por realizar, la ITU define la distribución del espectro electromagnético y las bandas disponibles para su uso, las cuales se resumen en la tabla 1 (ITU-T, 2015). Para las comunicaciones ópticas, se utilizan como ondas portadoras haces entre el espectro infrarrojo cercano y la luz visible, desde los 700 nm hasta los 1.600 nm, tal y como indica la norma G.652 de la ITU.

Tabla 1. Distribución de energía electromagnética definida por la ITU

Banda	Longitud de onda	Frecuencia	Banda	Longitud de onda	Frecuencia
Baja frecuencia	< 10 km	> 30 kHz	Infrarrojo	< 1 mm	> 300 GHz
Onda larga	< 10 km	> 30 kHz	Infrarrojo medio	< 50 μ m	> 6 THz
Onda media	< 650 m	> 650 kHz	Infrarrojo cercano	< 2.5 μ m	> 120 THz
Onda corta	< 180 m	> 1,7 MHz	Luz visible	< 780 nm	> 384 THz
Muy alta frecuencia	< 10 m	> 30 MHz	UV cercano	< 380 nm	> 789 THz
Ultra alta frecuencia	< 1 m	> 300 MHz	Rayos X	< 10 pm	> 30 PHz
Microondas	< 30 mm	> 1 GHz	Rayos gamma	< 10 pm	> 30 EHz

Fuente: ITU-T (2015).

1.5. Tipos de ruido en la fibra óptica

Si bien los enlaces de fibra óptica son inmunes al ruido eléctrico por las características propias de su construcción y funcionamiento, los materiales semiconductores que componen los sistemas de transmisión ópticos, especialmente en los multimodo, hacen que las ondas portadoras que viajan entre cada modo del enlace se mezclen de forma no lineal, generando así múltiples componentes de frecuencia que afectan la señal transmitida. El fenómeno más común que se considera ruido en este campo se denomina *diafonía*, que consiste en la distorsión de información en la señal transmitida por un enlace de fibra óptica.

La diafonía ocurre por la interferencia entre dos componentes de información, que se da a menudo después de la *multiplexación por división de longitud de onda* (WDM por sus siglas en inglés) en enlaces multimodo. Este fenómeno se debe al hecho de que dos componentes poseen una longitud de onda cercana al ancho de banda del receptor, lo que provoca que ambas se filtren como un solo componente de información (Keiser, 2010). Para modelar analíticamente este comportamiento, se parte de la *modulación de fase inducida* (SPM) y la *mezcla de cuarta onda* (FWM), las cuales se analizan en detalle en los siguientes capítulos.

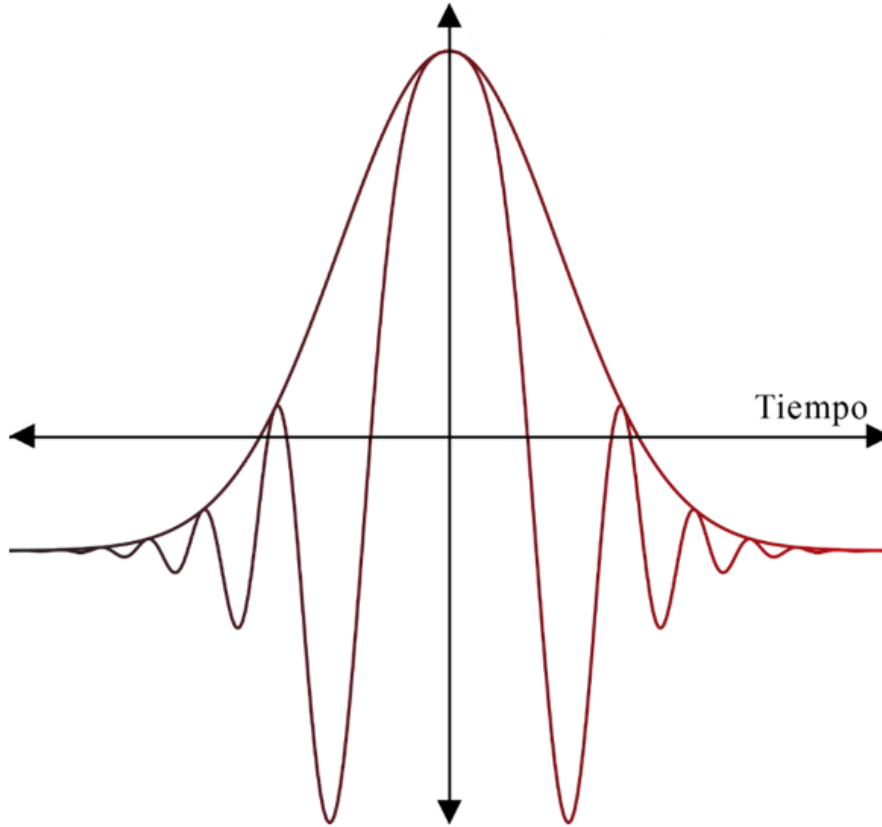
1.6. Pulso gaussiano

Para el modelamiento de los pulsos láser modulados digitalmente, se considera el cambio de intensidad de luz en el dominio del tiempo como un pulso modelado matemáticamente siguiendo una función gaussiana $\mathcal{K}(t)$. Con ese fin se emplea la expresión (1.2), donde (P_{in}) es la potencia óptica de entrada (usualmente en mW); (t) es el tiempo; y (T_0) es el ancho inicial del pulso dado en nanosegundos para las velocidades de transmisión utilizadas en las comunicaciones ópticas.

$$\mathcal{K}(t) = P_{in} \exp \left[- \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right]. \quad (1.2)$$

La forma en que los fenómenos lineales y no lineales debidos al enlace de fibra óptica afectan a la señal portadora y, por ende, a la información transmitida, se profundizan en los capítulos siguientes. En la figura 4 se representa el pulso gaussiano en el dominio del tiempo.

Figura 4. Pulso gaussiano en el dominio del tiempo



Fuente: elaboración propia.

1.7. Ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE)

Para comprender cómo la ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE) modela matemáticamente los fenómenos físicos que afectan la propagación de los pulsos, se debe partir de la ecuación de Helmholtz, la cual describe la aproximación paraxial de una ecuación de onda electromagnética que se propaga a través de un medio con no linealidades. Para el caso de la fibra óptica, se considera ausencia de cargas y corrientes, lo cual resulta en:

$$\nabla^2 E - \frac{n}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0. \quad (1.3)$$

En esta expresión, E es el campo eléctrico; c es la velocidad de la luz; n es el índice de refracción; y t es el tiempo.

Ahora es necesario realizar una aproximación monocromática para la función de campo eléctrico en el dominio del espacio y del tiempo. De este modo se obtiene (1.4), que describe la ecuación de onda como el producto de una función en el espacio y un fasor temporal que depende del tiempo, la frecuencia angular y la longitud de onda implícita en el número de onda (k):

$$E(x, y, z, t) = \mathcal{K}(x, y, z)e^{j(kz - \omega t)} + \mathcal{K}^*(x, y, z)e^{-j(kz - \omega t)}, \quad (1.4)$$

donde $\mathcal{K}(x, y, z)$ es la función de la componente espacial de la ecuación de onda; k es el número de onda; y ω es la frecuencia angular de la onda.

Si se considera que una onda electromagnética contenida en un enlace de fibra óptica se propaga principalmente a lo largo del eje z , lo que hará que la variación longitudinal en este sea mucho menor que las variaciones transversales en x y y , se puede resolver la ecuación diferencial al derivar con respecto al tiempo la fórmula de campo eléctrico y considerando los términos lineales y no lineales relevantes para un marco de propagación en fibra óptica. Con este procedimiento se obtiene (1.5), que también considera los fenómenos lineales de atenuación y dispersión cromática dados por un enlace de fibra óptica:

$$j \frac{\partial \mathcal{K}}{\partial z} = -j \frac{\alpha}{2} \mathcal{K} + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \mathcal{K}}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \mathcal{K}}{\partial T^3} - \gamma |\mathcal{K}| \mathcal{K},$$

donde (1.5)

$$T = t - \frac{z}{v_g}, v_g = \frac{c}{n}.$$

Esta ecuación diferencial define los fenómenos físicos que afectan los pulsos transmitidos a través de la fibra óptica. En este caso, (α) es la atenuación de potencia óptica; (β_2) y (β_3) son coeficientes derivados de la expansión de la serie de Taylor de la función de propagación de onda ($\beta(\omega)$), que definen la dispersión por velocidad de grupo (GVD) y la dispersión de tercer orden (TOD) respectivamente; (T) es un marco de referencia que se mueve con el pulso a la velocidad de grupo; y (γ) es el coeficiente no lineal de la fibra (dado en W^{-1}/km) (Agrawal, 2013).

1.8. Modulación *On-Off Keying* (OOK)

El marco teórico de este libro se construye sobre el modelo de un sistema de comunicaciones ópticas que transmite señales a través de una fibra óptica monomodo mediante el uso de pulsos

gaussianos, los cuales se encienden y apagan de forma binaria. Esta forma de modulación hace que un pulso gaussiano equivalga a un «1» lógico y que la ausencia de luz represente un «0» lógico, lo que representa una de las alternativas más simples y efectivas de comunicación de datos a través de medios guiados.

El principio de funcionamiento de un modulador OOK consiste simplemente en hacer una conversión analógico-digital de la señal que se quiere transmitir y configurar un láser que emita haces de luz en función de las cadenas de bits que se transmiten, considerando un tamaño de bytes predefinido que el demodulador podrá interpretar al recibir cierta cantidad de pulsos (Couch, 2007).

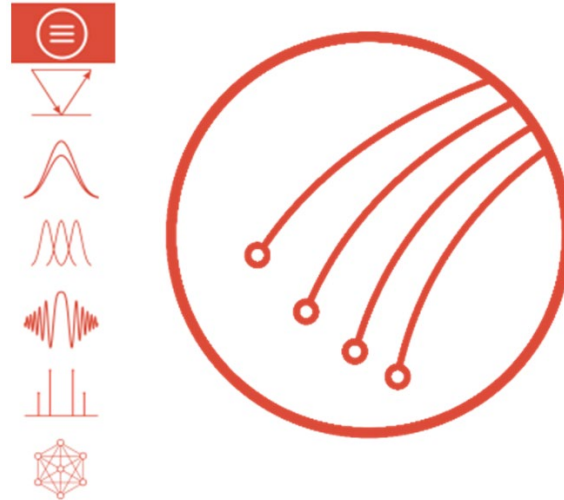
Una de las principales ventajas de este paradigma tiene que ver con la facilidad de implementación de la modulación, ya que se utilizan circuitos sencillos y conmutadores con frecuencia constante que generan el encendido y el apagado, abaratando los costos de implementación al poseer pocos componentes (Achari *et al.*, 2024). Sin embargo, por otro lado, el OOK tiene como principal desventaja su poca eficiencia espectral debido a que requiere de un pulso gaussiano por cada bit transmitido, de manera que para transmitir señales complejas se requieren muchos bytes y muchos pulsos, aumentando el consumo de ancho de banda y de potencia. Por otra parte, dados los fenómenos de dispersión y automodulación de fase, existe el riesgo de que los pulsos se solapen y generen errores en la interpretación de las señales por parte del demodulador, lo que exige implementar etapas adicionales que mitiguen estos efectos.

1.9. MainOptik Simulator

El MainOptik Simulator es un software de simulación de fenómenos lineales y no lineales en la transmisión por fibra óptica para escenarios con enlaces de fibra óptica multimodo bajo la modulación digital OOK, desarrollado por los autores del presente libro en el entorno de programación de software libre Python. Esta interfaz integra recursos gráficos con recursos programables para así obtener el programa que se utilizará en este texto. Además, para los módulos de SPM y FWM, se generan ventanas emergentes con gráficas bidimensionales adicionales que hacen parte de la simulación.

La figura 5 corresponde al logo diseñado para el software, y en los capítulos consecuentes se visualizarán cada uno de los módulos para la elaboración del programa. Las instrucciones para acceder a la herramienta están en el enlace <https://jorgegalvisvelandia.blogspot.com/2024/04/mainoptik-simulator.html>.

Figura 5. Logotipo del programa MainOptik Simulator



Fuente: elaboración propia.

1.10. Ejercicios resueltos

1. Si una fibra óptica tiene una atenuación de $\alpha = 1$ dB/km y un cable coaxial de $\alpha = 5$ dB/100 m, calcule: a) cuál es la longitud de cada medio si solo se admite una pérdida de 3 dB de potencia; b) cuál es la relación entre los dos medios; c) si la fibra tiene una longitud de 10 km, cuál es porcentaje de la potencia recibida.

Solución

a) La atenuación en función de la distancia en los medios sería igual a $A(z) = \alpha \times z$.

Para la fibra óptica sería $3 \text{ dB} = 1 \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \times z(\text{km})$

$$\boxed{z = 3 \text{ km.}}$$

Para el cable coaxial sería $3 \text{ dB} = 5 \left(\frac{\text{dB}}{100\text{m}} \right) \times z(\text{m})$

$$\boxed{z = 60 \text{ m.}}$$

b) Para los medios del ejemplo se puede decir que el cable coaxial atenúa la mitad de la potencia a los 60 m, mientras que la fibra óptica lo hace a 3 km.

Si se requiere que la potencia recibida a 1 km sea la misma en ambos medios. La potencia que se debe introducir al cable coaxial debe ser casi 80.000 veces la de la fibra óptica o 49 dB por encima.

$$P_R(dB) = P_T(dB) - A(dB)$$

Para el cable coaxial, $A(z)$ sería de $50 \text{ dB} = 5 \left(\frac{\text{dB}}{100\text{m}} \right) \times 1.000(\text{m})$.

Para la fibra óptica, $A(z)$ sería de $1 \text{ dB} = 1 \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \times 1(\text{km})$.

La diferencia es: $50 \text{ dB} - 1 \text{ dB} = 49 \text{ dB}$.

c) La atenuación a 10 km es $A(z) = 1 \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \times 10(\text{km}) = 10 \text{ dB}$

$$-10 = 10 \log \left(\frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \right)$$

$$P_{\text{salida}} = 0,1 P_{\text{entrada}}$$

La potencia de salida es 10 % de la potencia de entrada:

$$P_{\text{salida}} = 10 \% P_{\text{entrada}}$$

2. Una fibra óptica con índice de refracción del núcleo de 1,44 e índice de refracción del revestimiento de 1,41 tiene un radio del núcleo de 2 μm . a) Calcular si la fibra es monomodo o multimodo si se utiliza con un diodo láser que emite a una longitud de onda de 1.550 nm; b) calcular si la fibra es monomodo o multimodo si se utiliza con un diodo láser que emite a una longitud de onda de 850 nm.

Solución

Primero se calcula la apertura numérica. AN puede estimarse de la siguiente manera:

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$AN = \sqrt{1,44^2 - 1,41^2} = 0,292.$$

Posteriormente, se calcula la frecuencia normalizada usando (1.1):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a AN.$$

a) Para $\lambda = 1.550 \text{ nm}$:

$$V = \frac{2\pi}{(1.550 \times 10^{-9})} (2 \times 10^{-6}) (0,292)$$

$$\boxed{V = 2,370.}$$

Como $V < 2,405$, se puede concluir que a esa longitud de onda la fibra se comporta como monomodo.

b) Para $\lambda = 850 \text{ nm}$:

$$V = \frac{2\pi}{(850 \times 10^{-9})} (2 \times 10^{-6}) (0,292)$$

$$\boxed{V = 4,32}$$

Como $V > 2,405$, se puede concluir que a esa longitud de onda la fibra se comporta como multimodo.

1.11. Ejercicios propuestos

1. Una fibra óptica de 5 km de largo tiene una atenuación de 0,4 dB/km. Calcule el porcentaje de potencia recibida.
2. Una fibra óptica tiene una diferencia relativa de índices de 1 % y un índice de refracción del núcleo de 1,44. El radio del núcleo es de 2,7 μm , y se utiliza con un diodo láser que emite a una longitud de onda de 1.550 nm. Determine si la fibra es monomodo o se propaga en múltiples modos. Tenga en cuenta que la diferencia relativa de índice se define como:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + n_2^2}.$$

Capítulo 2. Óptica geométrica

2.1. Índice de refracción

El índice de refracción n se define como la relación existente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío c y la velocidad de propagación de la onda en el material estudiado v_g :

$$n = \frac{c}{v_g}. \quad (2.1)$$

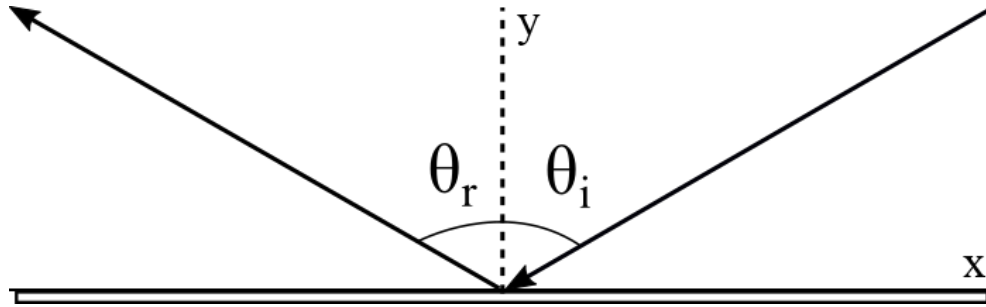
Como la velocidad de propagación de la luz en un medio será conceptualmente menor que en el vacío, es posible indicar que el valor mínimo que tomaría n será de 1 adimensional (Serway y Jewett, 2014). El índice de refracción se puede definir también como la relación de la longitud de onda de la señal en el vacío λ y la longitud de onda en el medio λ_g tal y como indica (2.2):

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_g}. \quad (2.2)$$

2.2. Ley de reflexión total

La ley de reflexión total indica que, para un rayo incidente con ángulo θ_i sobre una superficie uniforme, el ángulo de reflexión θ_r será igual al de incidencia, como se visualiza en la figura 6.

Figura 6. Representación de la ley de reflexión total

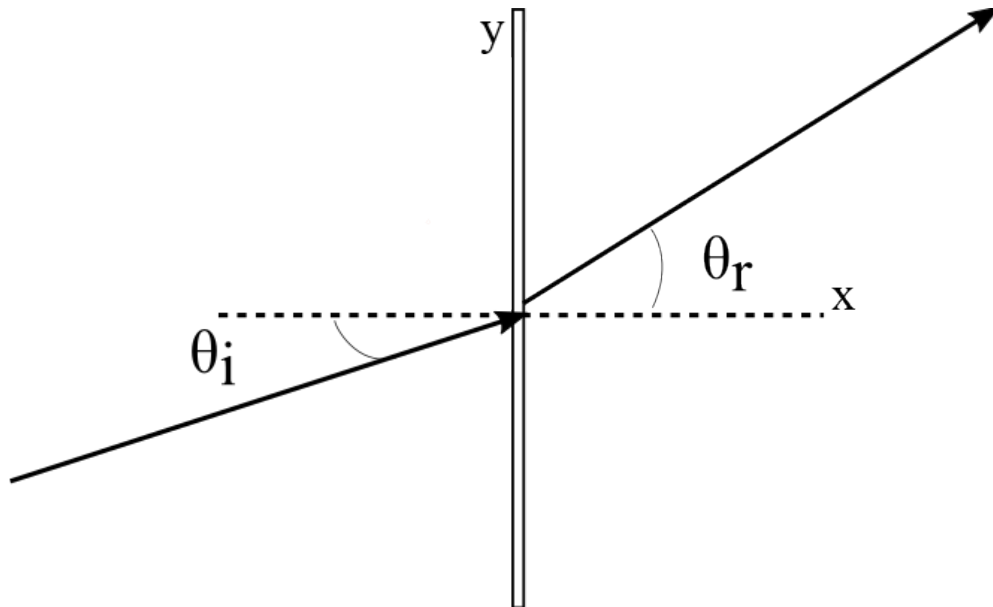


Fuente: elaboración propia.

2.3. Ley de refracción

La ley de refracción, también llamada ley de Snell por el científico neerlandés Willebrord Snell van Royen (1580-1626), es una relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción en una interfaz entre dos medios ópticos con índices de refracción n_1 y n_2 (Pedrotti, 2008). Este fenómeno se representa en la figura 7 y se modela analíticamente en (2.3).

Figura 7. Representación de la ley de refracción total



Fuente: elaboración propia

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r. \quad (2.3)$$

2.3.1. Relación de la ley de refracción con la transmisión por fibra óptica

Es fundamental considerar la ley de Snell en el momento de diseñar y construir enlaces de fibra óptica debido a que permite calcular el ángulo de incidencia y de refracción entre el transmisor, el núcleo y el revestimiento. Teniendo en cuenta este principio se busca que el núcleo de la fibra esté compuesto de materiales que posean un índice de refracción mayor que el del revestimiento, de forma que se asegure que la luz que entra a la fibra quede atrapada dentro del núcleo y se refleje dentro de este, para que viaje hasta el otro extremo del enlace.

Al considerar lo anterior se garantiza una pérdida mínima de la potencia de la onda portadora transmitida a lo largo del enlace de fibra ya que esta puede entrar en el revestimiento y esa porción de la señal no será recibida por el demodulador óptico. También es importante hacer un uso adecuado de uniones y empalmes entre fibras, especialmente cuando se utilizan repetidores de señal para largas distancias. Así, el éxito de la transmisión dependerá de la calidad y el número de estos elementos, ya que cualquier desajuste o alteración en el índice de refracción causará que la dispersión y la pérdida de potencia alteren tanto la señal que no pueda ser demodulada.

2.4. Ángulo crítico

Se define el ángulo crítico θ_c como aquel en el cual se presentará el fenómeno de reflexión interna total. Si el rayo incide con el valor del ángulo crítico, el haz de luz viajará a través de la interfaz (esto es, $\theta_r = 90^\circ$). Para calcular este valor, considerando estas condiciones, se parte de (2.3) para llegar a (2.4):

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin(90)$$

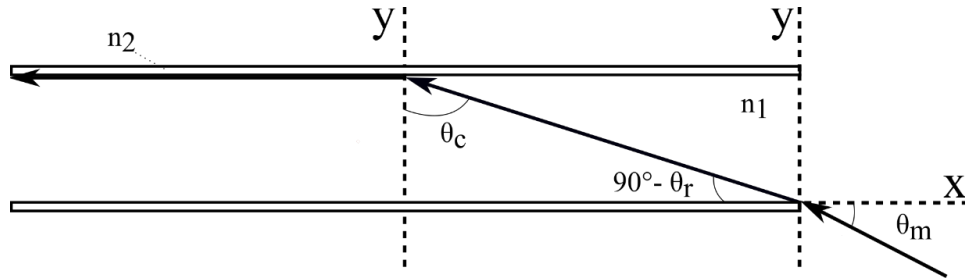
$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{n_2}{n_1} \right] \text{ si } n_1 > n_2. \quad (2.4)$$

2.5. Ángulo de aceptación máxima y apertura numérica

En un enlace de fibra óptica, el ángulo de aceptación máxima (θ_{am}) es el ángulo de entrada del haz de luz que permitirá que este mismo quede atrapado dentro del núcleo. Para esto, el ángulo de incidencia en el núcleo debe ser igual al ángulo crítico para el núcleo y el revestimiento. Considerando la figura 8, el ángulo de aceptación máxima se puede calcular en función del ángulo crítico a partir de (2.5). Por otro lado, la apertura numérica (AN) se define como el rango de ángulos en los que el enlace de fibra acepta luz, tal y como se muestra en (2.6) para un medio externo con índice de refracción n_{in}

La figura 8 muestra el principio de la guía de onda que se tiene en cuenta para construir un enlace de fibra óptica. En este caso el haz de luz incide con un ángulo θ_m que debe estar dentro del rango del ángulo de aceptación máxima. Así, cuando la luz entra por el núcleo, se refracta con un ángulo definido por el índice de refracción de dicho componente, dependiendo del material seleccionado. Este haz de luz queda confinado allí por la diferencia de índices de refracción que el núcleo tiene con el revestimiento. Al realizar la transmisión con un ángulo que tienda al de aceptación máxima, el haz de luz viajará a lo largo del enlace de fibra óptica sin sufrir demasiadas reflexiones que atrasen la transmisión o que generen dispersiones cromáticas.

Figura 8. Representación del escenario de comunicación considerado para el cálculo de θ_{am} y AN



Fuente: elaboración propia

$$\theta_{am} = \sin^{-1} \left[\frac{n_1}{n_{in}} \sin(90^\circ - \theta_c) \right]. \quad (2.5)$$

$$AN = n_{in} \sin \left(\frac{\theta_{am}}{2} \right). \quad (2.6)$$

Sin embargo, si se transmite fuera del rango del ángulo de aceptación máxima, la luz no quedará atrapada en el núcleo y podrá refractarse en el revestimiento del enlace de fibra óptica, lo que representará una pérdida de señal significativa por efectos refractivos dentro del revestimiento, o incluso fuera de la fibra óptica si el índice de refracción del recubrimiento plástico lo permite (algo que ni siquiera debería considerarse en estos casos al solo proteger el enlace del entorno). De esta forma se puede comprometer la eficiencia de la transmisión y reducir considerablemente la capacidad del enlace de fibra para transmitir datos. Por tanto, para el diseño de un sistema de comunicaciones óptico, se debe partir de (2.5) y (2.6) para calcular el ángulo adecuado en el que el haz de luz del modulador debe incidir en función del enlace de fibra que se adquiera para el sistema.

2.6. Ejercicios resueltos

1. Se tiene un enlace de fibra óptica monomodo con un núcleo con índice de refracción de 1,47 y un revestimiento con índice de refracción igual a 1,45. Con base en el escenario de la figura 8, calcular el ángulo crítico para que exista reflexión total dentro del núcleo y pueda transmitirse información, el ángulo requerido para que exista reflexión total dentro del núcleo, y la apertura numérica si el enlace se encuentra en el aire.

Solución

Para calcular el ángulo crítico dentro del núcleo, se recurre a (2.4) ya que se cumple la condición $n_1 > n_2$ (en enlaces de fibra óptica esta regla es fundamental):

$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{n_2}{n_1} \right]$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{1,45}{1,47} \right]$$

$$\boxed{\theta_c \cong 80,53790^\circ}$$

Con este dato, se debe garantizar que el rayo incidente θ_{in} dentro del enlace de fibra óptica genere un haz de luz con un ángulo mayor al ángulo crítico. Para esto, se utiliza (2.5) considerando el índice de refracción del aire:

$$\theta_{in} < \sin^{-1} \left[\frac{n_1}{n_{in}} \sin(90^\circ - \theta_c) \right]$$

$$\theta_{in} < \sin^{-1} \left[\frac{1,47}{1,00029} \sin(90^\circ - 80,53790^\circ) \right]$$

$$\boxed{\theta_{in} < 13,98459^\circ}$$

Para calcular la apertura numérica, se consideran el ángulo de aceptación máxima del enlace de fibra ($13,98459^\circ$) y el índice de refracción del aire en (2.6):

$$AN = n_{in} \sin \left(\frac{\theta_{am}}{2} \right)$$

$$AN = (1,00029)\sin\left(\frac{13,98459^\circ}{2}\right)$$

$$\boxed{AN = 0,12174}.$$

2. Se tiene un enlace de fibra óptica monomodo con un núcleo con índice de refracción de 1,77 y un revestimiento con índice de refracción igual a 1,65. Con base en el escenario de la figura 8, calcular el ángulo crítico para que exista reflexión total dentro del núcleo y pueda transmitirse información, el ángulo requerido para que exista reflexión total dentro del núcleo y la apertura numérica si el enlace se encuentra en el aire.

Solución

Para calcular el ángulo crítico dentro del núcleo, se recurre a (2.4) ya que se cumple la condición $n_1 > n_2$:

$$\theta_c = \sin^{-1}\left[\frac{n_2}{n_1}\right]$$

$$\theta_c = \sin^{-1}\left[\frac{1,65}{1,77}\right]$$

$$\boxed{\theta_c \cong 69,69^\circ}.$$

Con este dato, se debe garantizar que el rayo incidente θ_{in} dentro del enlace de fibra óptica genere un haz de luz con un ángulo mayor al ángulo crítico. Para esto, se utiliza (2.5) considerando el índice de refracción del aire:

$$\theta_{in} < \sin^{-1}\left[\frac{n_1}{n_{in}}\sin(90^\circ - \theta_c)\right]$$

$$\theta_{in} < \sin^{-1}\left[\frac{1,77}{1,00029}\sin(90^\circ - 69,69^\circ)\right]$$

$$\boxed{\theta_{in} < 37,8929^\circ}.$$

Para calcular la apertura numérica, se consideran el ángulo de aceptación máxima del enlace de fibra ($37,8929^\circ$) y el índice de refracción del aire en (2.6):

$$AN = n_{in} \sin\left(\frac{\theta_{am}}{2}\right)$$

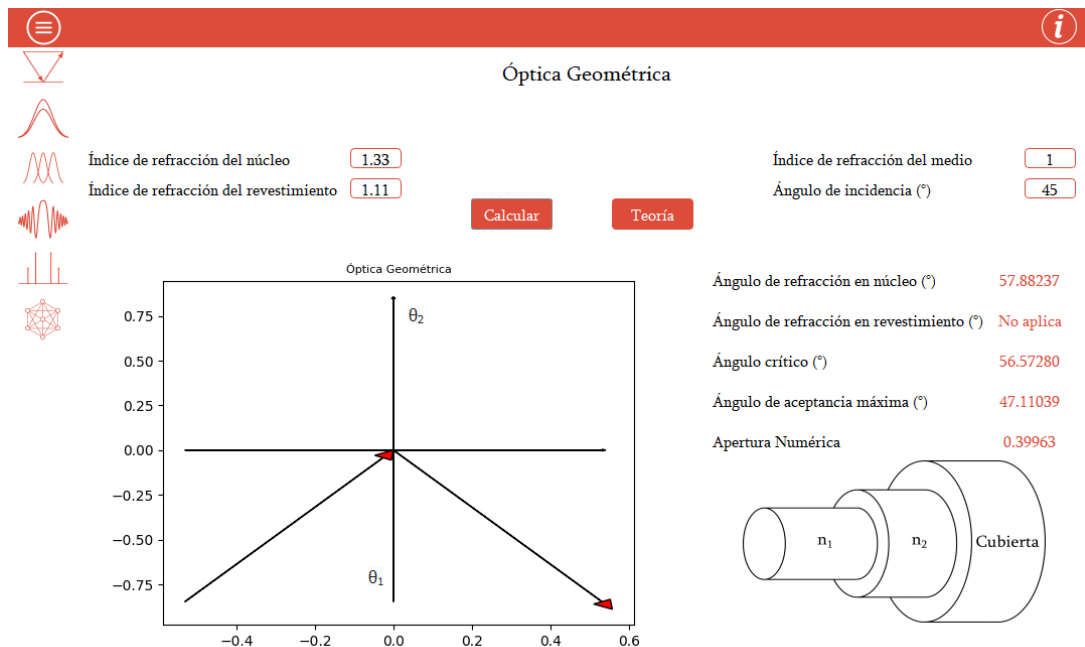
$$AN = (1,00029) \sin\left(\frac{37,8929^\circ}{2}\right)$$

$$AN = 0,32477$$

2.7. Simulación en MainOptik Simulator

En la figura 9 se muestra la ventana correspondiente al módulo de óptica geométrica, el cual consiste en cuatro datos de entrada con los que se harán los cálculos correspondientes a las ecuaciones descritas en este capítulo. Para este caso, el índice de refracción del núcleo es n_1 , el índice de refracción del revestimiento es n_2 , el índice de refracción del medio es n_{in} , y el ángulo de incidencia θ_{in} es el dado por el rayo al atravesar la interfaz entre el medio y el núcleo de la fibra, como se muestra en la figura 8. Por otra parte, en el plano cartesiano mostrado en el módulo, los cuadrantes III y IV representan el núcleo; los I y II corresponden al revestimiento; y el eje x es la frontera entre estos materiales.

Figura 9. Módulo de óptica geométrica en MainOptik Simulator para el primer escenario



Fuente: elaboración propia

Para este ejemplo de uso, se consideran los siguientes valores: índice de refracción en el núcleo $n_1 = 1,33$; índice de refracción en el revestimiento $n_2 = 1,11$; índice de refracción en el medio $n_{in} = 1$; y ángulo de incidencia $\theta_{in} = 45^\circ$.

Se puede observar que estas condiciones hacen que el láser se transmita únicamente por el núcleo, cumpliendo con la refracción total. Por otra parte, en la tabla 2 se ordenan los resultados numéricos que corresponden al escenario de comunicación simulado. Es posible observar que el ángulo de refracción en el núcleo es cercano al ángulo crítico del enlace de fibra óptica.

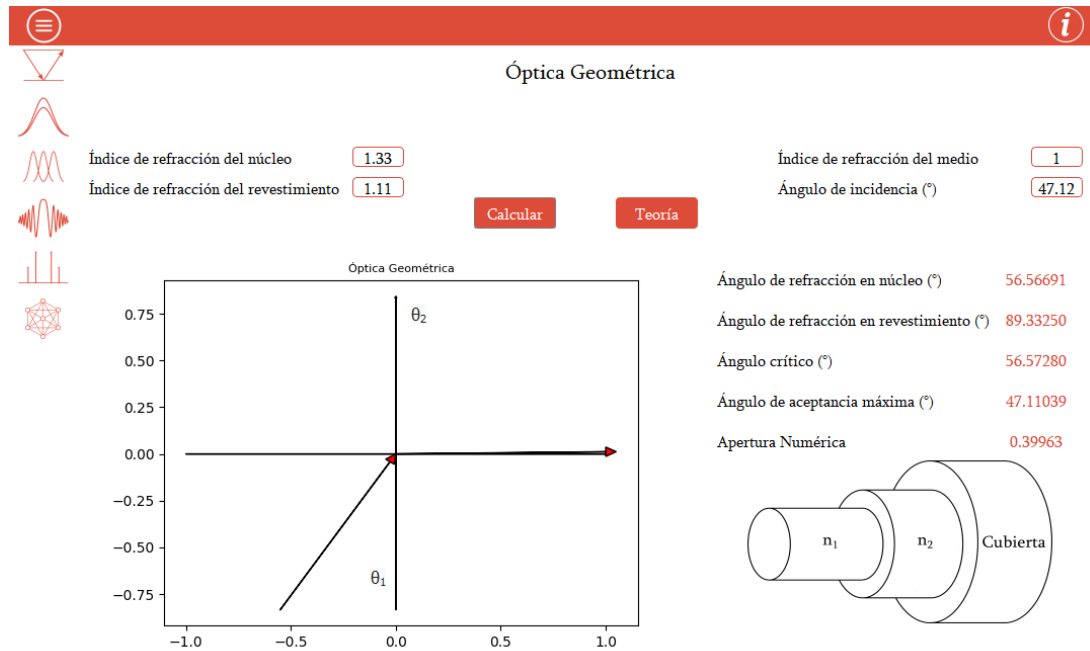
Tabla 2. Resultados para el primer escenario de comunicación

Parámetro	Valor
Ángulo de refracción en el núcleo	57,88237°
Ángulo de refracción en el revestimiento	No aplica
Ángulo crítico	56,57280°
Ángulo de aceptación máxima	47,11039°
Apertura numérica	0,39963

Fuente: elaboración propia.

Ahora, si se cambia el ángulo de incidencia a $47,12^\circ$, el haz de luz atraviesa la interfaz entre el núcleo y el revestimiento, por lo que no es posible la comunicación en este escenario, tal y como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Módulo de óptica geométrica en MainOptik Simulator para el segundo escenario, donde no es posible la transmisión de datos



Fuente: elaboración propia.

2.8. Ejercicios propuestos

1. A partir de la figura 8, demostrar que el ángulo de aceptación máxima del enlace de fibra óptica para cualquier índice de refracción en el núcleo, el revestimiento y el medio externo es igual a (2.5).
2. Para un enlace de fibra óptica monomodo con núcleo de vidrio flint ligero y revestimiento de teflón sumergido en agua, calcular el ángulo de refracción dentro del núcleo y del revestimiento si el ángulo de incidencia es 45°. Comprobar resultados en MainOptik Simulator.

Capítulo 3. Atenuación y dispersión cromática en la fibra óptica

3.1. Atenuación en la fibra óptica

La atenuación de la señal (también conocida como pérdida de fibra o pérdida de señal) es una de las propiedades más importantes de un enlace de fibra óptica debido a que determina en gran medida la separación máxima sin amplificación o sin repetidor entre un transmisor y un receptor. Se entiende como la pérdida de potencia debido a la capacidad de absorción de energía del material de la fibra, así como por imperfecciones en la construcción del medio, la longitud del canal, entre otros factores (Keiser, 2010).

Para una señal de entrada $\mathcal{K}(0, t)$ con una potencia óptica de entrada P_{in} , la potencia de salida en el dominio del tiempo en función de la longitud del enlace z , afectada por el fenómeno de atenuación generado por el coeficiente de atenuación α , la pérdida ocasionada por el número de conectores IO en dB (IOdB) y el número de empalmes utilizados E , igualmente en dB ($E\text{dB}$), está dada por:

$$\mathcal{K}(z, t) = P_{in} \mathcal{K}(0, t) \exp \left[-\frac{A(z)}{2} \right], \quad (3.1)$$

donde

$$A(z) = \frac{\alpha z + E(E\text{dB}) + \text{IO}(\text{IOdB})}{10 \log e}.$$

Como parámetro de evaluación, se puede expresar la atenuación total de la fibra en función de la distancia $A(z)$ en (3.2) como la suma de las pérdidas consideradas en el medio de transmisión configurado:

$$A(z) = \alpha z + E(\text{EdB}) + \text{IO}(\text{IOdB}). \quad (3.2)$$

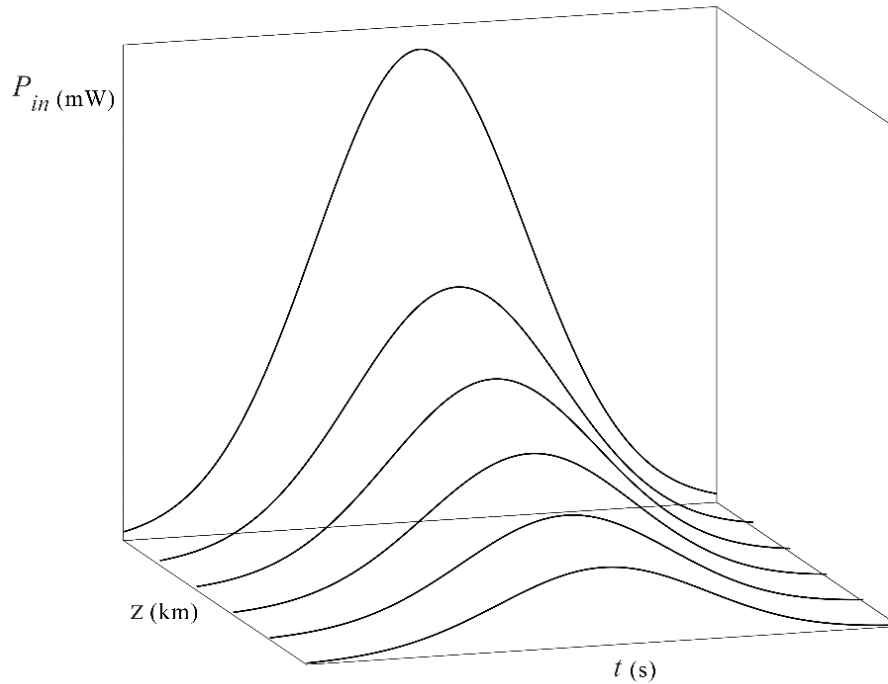
Asimismo, es posible definir las pérdidas por los conectores ($\text{IO}_{Total}(\text{dB})$) y empalmes ($E_{Total}(\text{dB})$) como el producto entre la pérdida de cada uno por el número de elementos implementados en el enlace, como se muestra en (3.3) y (3.4):

$$\text{IO}_{Total}(\text{dB}) = \text{IO}(\text{IOdB}). \quad (3.3)$$

$$E_{Total}(\text{dB}) = E(\text{EdB}). \quad (3.4)$$

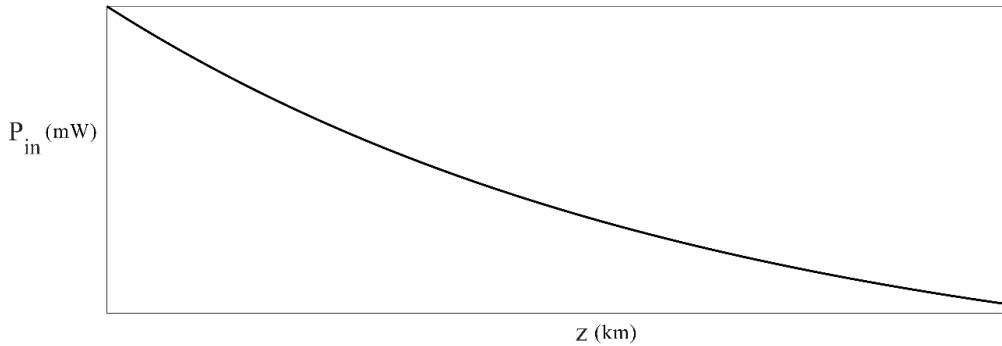
Considerando estas ecuaciones, es posible analizar la atenuación de la fibra óptica para un pulso gaussiano en función de la distancia y del tiempo de forma independiente, observando que existe una relación inversamente proporcional entre la distancia y la potencia óptica transmitida por el enlace. Así, en las figuras 11 y 12 se puede apreciar cómo se propagan los pulsos gaussianos a lo largo de un enlace con longitud z .

Figura 11. Propagación de pulsos gaussianos a lo largo de un enlace de fibra óptica en función del tiempo y de la distancia



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Variación de la potencia óptica del pulso gaussiano propagado a través de la fibra óptica en función de la longitud del enlace



Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Fuentes de pérdida de potencia en sistemas ópticos

Un sistema de comunicaciones por fibra óptica de larga distancia tiene múltiples fuentes de pérdida de potencia que pueden ser propias del medio de transmisión, de los moduladores y demoduladores, de las adaptaciones que se deban hacer al enlace de fibra, entre otros. La fuente de pérdida más común, y que fue considerada en las ecuaciones de atenuación de este capítulo, es el uso de conectores.

Los conectores se utilizan para unir tramos de fibra óptica entre sí, o bien para conectar el enlace al modulador y al demodulador del sistema optoelectrónico, lo cual significa que como mínimo se utilizan dos de ellos en un proceso de comunicación. Estos elementos, sin embargo, introducen pérdidas debido a la imperfección en el alineamiento de los cables y a la pérdida por contacto que, si bien puede ser una distancia muy pequeña (en el orden de los micrómetros), por la escala y la sensibilidad de las señales usadas, tienen efecto apreciable, que se ubica entre los 0,2 dB y 0,5 dB por cada conector utilizado.

Por otra parte, los empalmes, que se utilizan como uniones irreversibles entre dos enlaces de fibra óptica, también generan pérdidas de potencia debido a la alteración de la estructura del material en esos puntos. Así, dependiendo del tipo de empalme se obtienen pérdidas. Los más conocidos son los empalmes por fusión (con pérdidas de 0,1 dB por cada empalme) y los empalmes mecánicos (con pérdidas de 0,3 dB aproximadamente). Estos últimos, en particular, generan mayores pérdidas que los primeros por la imperfección al alinear los núcleos de la fibra.

Además, otras fuentes de pérdida de potencia en un sistema de comunicaciones por fibra óptica son el propio material de construcción de este medio, el ángulo de incidencia del haz de

luz dentro de la fibra (como se analizó en el capítulo 2), la dispersión cromática y la longitud de onda utilizada. Para modelar matemáticamente estas pérdidas, se considera el coeficiente de atenuación del enlace de fibra, que se debe medir de manera experimental antes de hacer transmisiones, aunque normalmente ronda los 0,2 dB/km en fibras ópticas modernas.

Finalmente, otra fuente de atenuación es la pérdida de potencia por el uso de repetidores para amplificar las señales en largas distancias debido a que estos dispositivos pueden reducir la eficiencia de conversión e introducir ampliificaciones de ruido. También cabe señalar las características propias del entorno, como contaminaciones en el núcleo de la fibra en su construcción, curvaturas excesivas y microdobles en el cable. Por lo tanto, cuidar todos estos detalles es importante para garantizar la fiabilidad de las comunicaciones realizadas con los sistemas optoelectrónicos.

3.1.2. Ejercicios resueltos de atenuación

1. Para un sistema de comunicaciones ópticas, el cual consiste en un transmisor que emite una señal portadora con potencia óptica de entrada de 10 mW, se instala un enlace de fibra óptica monomodo (SMF) de 50 km con coeficiente de atenuación de 0,21 dB/km, con dos conectores con pérdida de 0,1 dB cada uno, y 20 empalmes con 0,2 dB de pérdida para cada uno. Calcular:

- Atenuación por efecto de los conectores (en dB).
- Atenuación por efecto de los empalmes (en dB).
- Atenuación por efecto de la absorción de la fibra (en dB).
- Atenuación en función de la distancia $A(z)$ (en dB).
- Potencia de salida (en mW).

Solución

a) Utilizando (3.3) para calcular las pérdidas por conectores, se tiene:

$$I_{O_{Total}}(dB) = I_O(I_O dB) = (2)(0,1 \text{ dB}) = 0,2 \text{ dB}.$$

b) Por otra parte, se utiliza (3.4) para calcular las pérdidas por empalmes:

$$E_{Total}(dB) = E(E dB) = (20)(0,2 \text{ dB}) = 4 \text{ dB}.$$

c) Esta variable se define como el producto del coeficiente de atenuación α en función de la longitud del enlace de fibra óptica z . Sabiendo esto, se utiliza este factor de (3.2):

$$\alpha z = (0,21 \text{ dB/km})(50 \text{ km}) = 10,5 \text{ dB}.$$

d) La atenuación total en el sistema está dada por la suma aritmética de las atenuaciones de cada componente. Utilizando (3.2), se tiene:

$$A(z) = \alpha z + E_{Total}(dB) + lO_{Total}(dB) = 10,5 \text{ dB} + 4 \text{ dB} + 0,2 \text{ dB} = 14,7 \text{ dB}.$$

e) Para calcular la potencia óptica en el extremo final de la fibra, se debe convertir el valor de $A(z)$ a decimal:

$$A(z) = \frac{\alpha z + E_{Total}(dB) + lO_{Total}(dB)}{10 \log e} = \frac{14,7}{10 \log e} \cong 3,385.$$

Una vez hecho esto, se utiliza la definición de la potencia óptica en función de la atenuación para un pulso gaussiano dada por (3.1):

$$P_0(z) = P_{in} \exp\left[-\frac{A(z)}{2}\right]$$

$$P_0(z) = P_{in} \exp\left[-\frac{14,7}{20 \log e}\right] = (10 \text{ mW}) \exp\left[-\frac{14,7}{20 \log e}\right] \cong 1,84077 \text{ mW}.$$

2. Para un sistema de comunicaciones ópticas, el cual consiste en un transmisor que emite una señal portadora con potencia óptica de entrada de 25 mW, se instala un enlace de fibra óptica monomodo (SMF) de 100 km con coeficiente de atenuación de 0,21 dB/km, con 10 conectores con pérdida de 0,1 dB cada uno, y 50 empalmes con 0,2 dB de pérdida para cada uno. Calcular:

- Atenuación por efecto de los conectores (en dB).
- Atenuación por efecto de los empalmes (en dB).
- Atenuación por efecto de la absorción de la fibra (en dB).
- Atenuación en función de la distancia $A(z)$ (en dB).
- Potencia de salida (en mW).

Solución

a) Utilizando (3.3) para calcular las pérdidas por conectores, se tiene:

$$I_{O_{Total}}(dB) = I_O(I_O dB) = (10)(0,1 \text{ dB}) = 1 \text{ dB}.$$

b) Por otra parte, se utiliza (3.4) para calcular las pérdidas por empalmes:

$$E_{Total}(dB) = E(E dB) = (50)(0,2 \text{ dB}) = 10 \text{ dB}.$$

c) Esta variable se define como el producto del coeficiente de atenuación α en función de la longitud del enlace de fibra óptica z . Sabiendo esto, se utiliza este factor de (3.2):

$$\alpha z = (0,21 \text{ dB/km})(100 \text{ km}) = 21 \text{ dB}.$$

d) La atenuación total en el sistema está dada por la suma aritmética de las atenuaciones de cada componente. Utilizando (3.2), se tiene:

$$A(z) = \alpha z + E_{Total}(dB) + I_{O_{Total}}(dB) = 21 \text{ dB} + 10 \text{ dB} + 1 \text{ dB} = 32 \text{ dB}.$$

e) Para calcular la potencia óptica en el extremo final de la fibra, se debe convertir el valor de $A(z)$ a decimal:

$$A(z) = \frac{\alpha z + E_{Total}(dB) + I_{O_{Total}}(dB)}{10 \log e} = \frac{32}{10 \log e} \cong 7,368.$$

Una vez hecho esto, se utiliza la definición de la potencia óptica en función de la atenuación para un pulso gaussiano dada por (3.1):

$$P_0(z) = P_{in} \mathcal{K}(0, t) \exp \left[-\frac{A(z)}{2} \right]$$

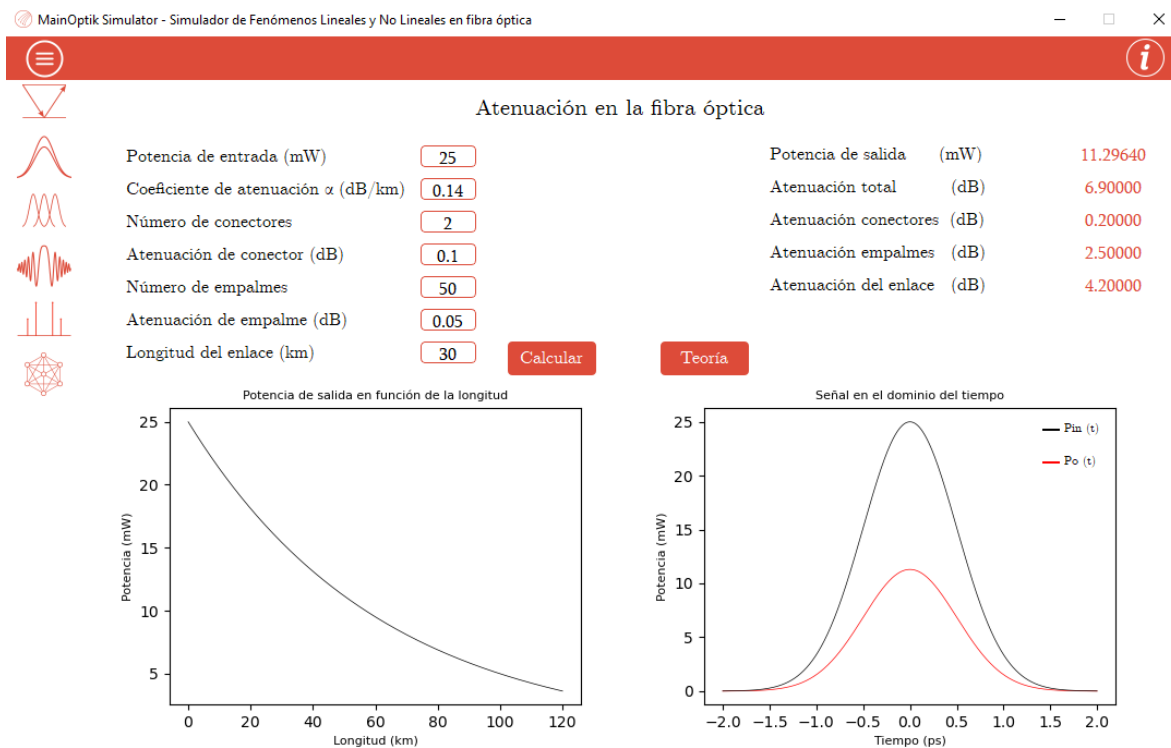
$$P_0(z) = P_{in} \exp \left[-\frac{32}{20 \log e} \right] = (25 \text{ mW}) \exp \left[-\frac{32}{20 \log e} \right] \cong 627,97 \mu W.$$

3.1.3. Simulación de atenuación en MainOptik Simulator

La figura 13 muestra la ventana correspondiente al módulo de atenuación, el cual consiste en siete datos de entrada con los que se harán los cálculos correspondientes a las ecuaciones

descritas en esta sección. Las pérdidas de potencia por conectores y empalmes, así como el coeficiente de atenuación, deben ingresarse en decibeles debido a que estas son las unidades utilizadas en el campo. El programa entrega como salidas numéricas la potencia de salida para la distancia dada, la atenuación debida a los conectores y los empalmes en el sistema. De igual forma, arroja una gráfica que representa la pérdida de potencia en función de la distancia y el pulso gaussiano atenuado debido a cada atenuación.

Figura 13. Módulo de atenuación en MainOptik Simulator para el escenario de atenuación



Fuente: elaboración propia.

Para este ejemplo, se utilizan los siguientes valores y se ordenan sus resultados en la tabla 3: potencia óptica de entrada $P_{in} = 25 \text{ mW}$; coeficiente de atenuación $\alpha = 0,14 \text{ dB/km}$; número de conectores $IO = 2$; atenuación de cada conector $IO_{dB} = 0,1 \text{ dB}$; número de empalmes $E = 50$; atenuación de cada empalme $E_{dB} = 0,05 \text{ dB}$; y longitud del enlace $z = 30 \text{ km}$.

Tabla 3. Resultados de la atenuación para el escenario de comunicación

Parámetro	Valor
P_o	11,29640
$A(z)$	6,9 dB
$\text{IO}_{Total}(dB)$	0,2 dB
$E_{Total}(dB)$	2,5 dB
αz	4,2 dB

Fuente: elaboración propia.

3.2. Dispersión en la fibra óptica

3.2.1. Función de propagación de onda $\beta(\omega)$

La función de propagación de onda en función de la frecuencia permite analizar los efectos dispersivos de un enlace de fibra óptica (Agrawal, 2013). Expandiendo $\beta(\omega)$ mediante la serie de Taylor, se obtiene:

$$\beta(\omega) \approx \beta_0(\omega_0) + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{\beta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2. \quad (3.5)$$

La dispersión para pulsos gaussianos en el orden de los nanosegundos está dada por los efectos dispersivos del parámetro GVD, modelado matemáticamente como β_2 . El valor de GVD varía en función de la longitud de onda del láser λ y de la función de dispersión cromática $D(\lambda)$, tal y como se muestra en (3.6), donde c es la velocidad de propagación de la luz en el vacío (en nm/ps) y n_c es el índice de refracción del núcleo:

$$\beta_2 = -\frac{D(\lambda)}{2\pi c} n_c \lambda^2. \quad (3.6)$$

La presencia de GVD altera el comportamiento de las componentes de frecuencia de un pulso que se propaga a diferentes velocidades a lo largo de un enlace de fibra óptica. Por lo tanto, en función del signo que tome β_2 , se generará un ensanchamiento (dispersión normal para $\beta_2 \geq 0$) o una compresión (dispersión anómala para $\beta_2 < 0$) del pulso gaussiano en el dominio del tiempo.

3.2.2. Dispersión cromática $D(\lambda)$ y pendiente de dispersión $S(\lambda)$

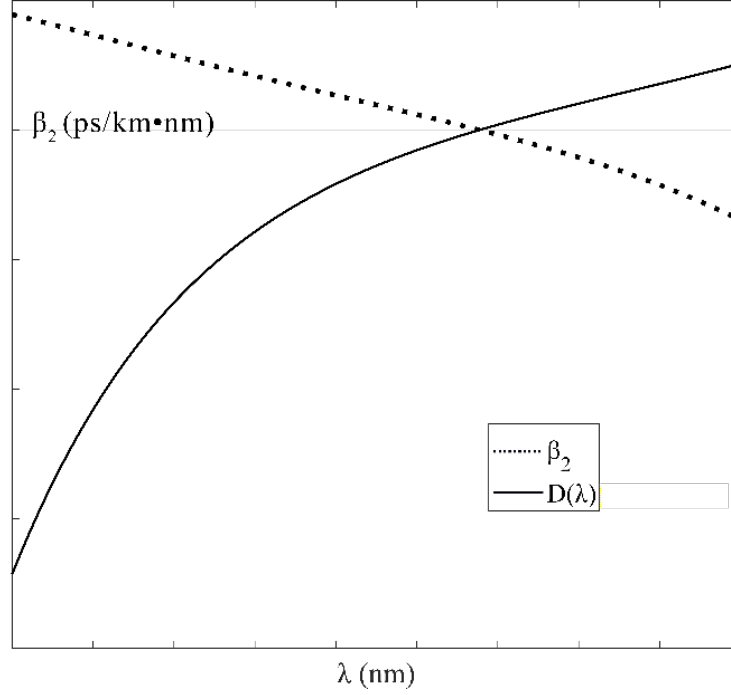
El valor de la dispersión cromática de la fibra para un enlace de fibra óptica monomodo se puede calcular a partir de los datos en la tabla 4 (Ghatak y Thyagarajan, 2000). Utilizando interpolación exponencial a través de software matemático, se obtiene la definición analítica dada en (3.7), donde el valor de $D(\lambda)$ varía en función de valores continuos de λ . En la figura 14, entretanto, se observa el comportamiento de la dispersión cromática en función de la longitud de onda, y de GVD para ($n_c = 1$). Por otra parte, la pendiente de dispersión $S(\lambda)$ es la razón de cambio de la dispersión en función de la longitud de onda, descrita matemáticamente como $S(\lambda) = D'(\lambda)$.

Tabla 4. Valores típicos de dispersión cromática

Longitud de onda λ (nm)	$D(\lambda) \left(\frac{ps}{km \times nm} \right)$	Longitud de onda λ (nm)	$D(\lambda) \left(\frac{ps}{km \times nm} \right)$
700	-172,902	1.200	-8,14213
750	-135,313	1.250	-2,57872
800	-106,609	1.300	2,38579
850	-84,2077	1.350	6,86631
900	-66,382	1.400	10,9539
950	-51,9441	1.450	14,7211
1.000	-40,0577	1.500	18,2268
1.050	-30,1214	1.550	21,5187
1.100	-21,6951	1.600	24,6358
1.150	-14,4511		

Fuente: Ghatak y Thyagarajan (2000).

Figura 14. Dispersión cromática en la fibra óptica



Fuente: elaboración propia

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234\lambda)} - 3,879e^{(-0,004427\lambda)}. \quad (3.7)$$

3.2.3. Efectos dispersivos en el dominio del tiempo

Se define (3.8) para un pulso gaussiano en el dominio del tiempo $\mathcal{K}(0, t)$ con un ancho de pulso T_0 en el orden de nanosegundos y una potencia de entrada P_{in} (De Prado *et al.*, 2019).

$$\mathcal{K}(0, t) = P_{in} \exp \left[- \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right]. \quad (3.8)$$

Este pulso se propaga a una distancia z definida por la longitud del enlace de fibra, y presentará un ensanchamiento dado por el efecto de $D(\lambda)$ y la variación del ancho espectral de la señal generada por el transmisor ($\Delta\lambda$), tal y como se observa en (3.9). De esta forma se puede definir la función $\mathcal{K}(z, t)$ como un pulso gaussiano con un ancho de pulso T_1 :

$$T_1 = T_0 + |D(\lambda) \Delta\lambda z|. \quad (3.9)$$

3.2.4. Efectos dispersivos en el dominio de la frecuencia

Para obtener la definición del pulso gaussiano en el dominio de la frecuencia $\mathcal{K}(0, \omega)$, se aplica la transformada de Fourier a (3.8), lo que da como resultado (3.10), donde se puede observar que se conserva el comportamiento gaussiano. En este dominio, el fenómeno de dispersión por GVD genera un corrimiento en frecuencia y una disminución del ancho de pulso de la señal, lo que puede causar solapamiento entre múltiples portadoras frecuenciales:

$$\mathcal{K}(0, \omega) = \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{2}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{4} \right]. \quad (3.10)$$

Para calcular la señal gaussiana en el dominio de la frecuencia, se procede a definir el enlace de fibra óptica como un sistema cuya función de transferencia $H(z, \omega)$ se describe en:

$$H(z, \omega) = \exp \left[\frac{jz\beta_2}{2} (\omega - \omega_0)^2 \right],$$

donde (3.11)

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2 \ln[2]}}{T_0}.$$

Luego, mediante el teorema de convolución, se puede conocer la señal de salida en el dominio de la frecuencia $\mathcal{K}(z, \omega)$:

$$\mathcal{K}(z, \omega) = \mathcal{K}(0, \omega)H(z, \omega). \quad (3.12)$$

3.2.5. Ejercicios resueltos de dispersión

1. En un sistema de comunicaciones ópticas que consiste en un enlace de fibra monomodo SMF de 100 km con un índice de refracción de 1,2, se propaga un pulso láser modelado matemáticamente como un pulso gaussiano que posee un ancho temporal de entrada T_0 de 6 ns, generado por un transmisor con longitud de onda de operación de 1.320 nm y que posee una variación de ancho espectral de aproximadamente 25 nm. Calcular:
 - a) Dispersión de la fibra (en $ps/(km \times nm)$).
 - b) GVD β_2 (en ps^2/km).

- c) Pendiente de dispersión de la fibra (en $ps/(km \times nm^2)$).
d) Ancho temporal de salida T_1 (en ns).

Solución

La dispersión de la fibra óptica puede calcularse a partir de (3.7), considerando que, para usar la ecuación, el valor de longitud de onda se ingresa en nanómetros y no en metros (1.320 nm y no 1.320×10^{-9} m):

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234\lambda)} - 3.879e^{(-0,004427\lambda)}$$

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234(1.320))} - 3.879e^{(-0,004427(1.320))} \approx 3,74774 \frac{ps}{km \times nm}$$

Una vez conocido $D(\lambda)$ para el valor de longitud de onda de operación, se recurre a (3.6) para calcular GVD, considerando nuevamente que la longitud de onda está dada en nanómetros, y la velocidad de la luz, en nm/ps:

$$\beta_2 = -\frac{D(\lambda)}{2\pi c} n_c \lambda^2$$

$$\beta_2 = -\frac{(3,74774)}{2\pi(300 \times 10^3)} (1,2)(1.320)^2 = -4,15717 \frac{ps^2}{km}$$

Sabiendo que la pendiente de dispersión está dada por la razón de cambio de la dispersión cromática en función de la longitud de onda, se deriva (3.7) y se evalúa esta expresión en $\lambda = 1.320$ nm:

$$S(\lambda) \approx \frac{dD(\lambda)}{d\lambda} \approx 0,08485 \frac{ps}{km \times nm^2}$$

Finalmente, con estos datos se calcula el ancho temporal en el extremo del receptor del sistema utilizando (3.9). Considerando las unidades, el resultado del valor absoluto está dado en picosegundos, por lo que debe convertirse la dispersión a ns/(km × nm):

$$T_1 = T_0 + |D(\lambda) \Delta \lambda z|$$

$$T_1 = (6 \text{ ns}) + |(3,74774 \times 10^3)(25 \text{ nm})(100 \text{ km})| = 15,36936 \text{ ns}$$

2. En un sistema de comunicaciones ópticas que consiste en un enlace de fibra monomodo SMF de 50 km con un índice de refracción de 1,5, se propaga un pulso láser modelado matemáticamente como un pulso gaussiano que posee un ancho temporal de entrada T_0 de 6 ns, generado por un transmisor con longitud de onda de operación de 850 nm y que posee una variación de ancho espectral de aproximadamente 50 nm. Calcular:

- Dispersión de la fibra (en $ps/(km \times nm)$).
- GVD β_2 (en ps^2/km).
- Ancho temporal de salida T_1 (en ns).

Solución

La dispersión de la fibra óptica puede calcularse a partir de (3.7), considerando que, para usar la ecuación, el valor de longitud de onda se ingresa en nanómetros y no en metros (850 nm y no 850×10^{-9} m):

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234\lambda)} - 3.879e^{(-0,004427\lambda)}$$

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234(850))} - 3.879e^{(-0,004427(850))} \approx -85,06 \frac{ps}{km \times nm}.$$

Una vez conocido $D(\lambda)$ para el valor de longitud de onda de operación, se recurre a (3.6) para calcular GVD, considerando nuevamente que la longitud de onda está dada en nanómetros, y la velocidad de la luz, en nm/ps:

$$\beta_2 = -\frac{D(\lambda)}{2\pi c} n_c \lambda^2$$

$$\beta_2 = -\frac{(-85,06)}{2\pi(300 \times 10^3)} (1,5)(850)^2 = 48,91 \frac{ps^2}{km}.$$

Finalmente, con estos datos se calcula el ancho temporal en el extremo del receptor del sistema utilizando (3.9). Considerando las unidades, el resultado del valor absoluto está dado en picosegundos, por lo que debe convertirse la dispersión a $ns/km \times nm$:

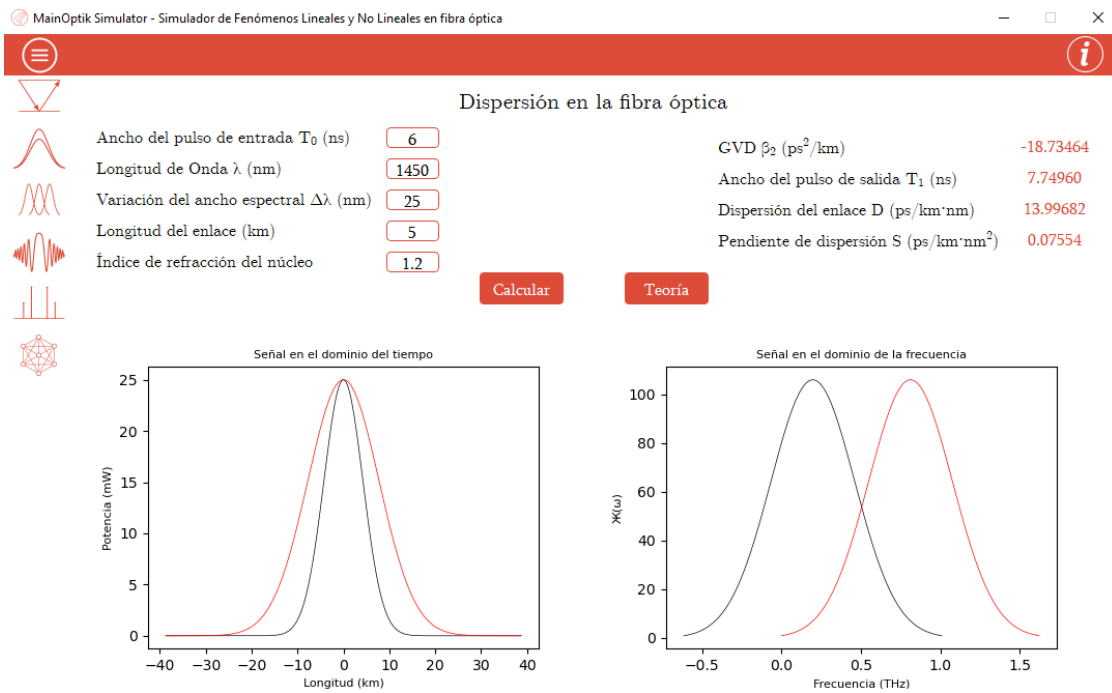
$$T_1 = T_0 + |D(\lambda) \Delta \lambda z|$$

$$T_1 = (6 ns) + \left| \left(-85,06 \times 10^3 \frac{ns}{km \times nm} \right) (50 nm)(50 km) \right| = 218,65 ns.$$

3.2.6. Simulación de dispersión en MainOptik Simulator

En la figura 15 se muestra la ventana correspondiente al módulo de dispersión, el cual requiere cinco datos de entrada con los que se harán los cálculos correspondientes a las ecuaciones descritas en esta sección. En este caso se omite la potencia óptica de la señal porque, para el orden de los nanosegundos, la dispersión cromática posee un comportamiento lineal y no influye en la potencia de entrada; también para efectos de análisis del fenómeno y facilidad en su compresión.

Figura 15. Módulo de dispersión en MainOptik Simulator para el escenario de comunicación



Fuente: elaboración propia.

El programa entrega como salidas numéricas la GVD en función de la longitud de onda, la dispersión cromática, la pendiente de dispersión y el ancho temporal del pulso en el extremo final. Para este ejemplo, se utilizan los siguientes valores: ancho temporal del pulso de entrada $T_0 = 6$ ns; longitud de onda $\lambda = 1.450$ nm; variación del ancho espectral del transmisor $\Delta\lambda = 25$ nm; longitud del enlace $z = 5$ km; e índice de refracción del núcleo $n_c = 1.2$.

La tabla 5 muestra los resultados de la dispersión cromática para un escenario de comunicación óptica. El parámetro β_2 indica la dispersión temporal de los pulsos ópticos a lo

largo de la fibra, de manera que un valor negativo sugiere que hay una dispersión anómala, donde los componentes de mayor longitud de onda viajan más rápido que los de menor longitud de onda. El parámetro T_1 , por su parte, representa el retardo temporal de la señal a lo largo de los 5 km de longitud que posee la fibra. Esto último es crucial para sincronizar la recepción de datos en el extremo receptor debido a que esta diferencia puede generar errores en la decodificación por parte del demodulador.

Por otra parte, $D(\lambda)$ indica el cambio en el retardo de grupo con la longitud de onda. Así, un valor moderado en este parámetro es esencial para mantener la integridad de la señal a lo largo de grandes distancias, minimizando el ensanchamiento de los pulsos, que genera solapamiento entre los bits. Finalmente, $S(\lambda)$ corresponde a la variación de la dispersión cromática con la longitud de onda, y es importante para sistemas de comunicación que utilizan un ancho de banda amplio.

Tabla 5. Resultados de la dispersión cromática para el escenario de comunicación

Parámetro	Valor
β_2	$-18,73464 \frac{ps^2}{km}$
T_1	$7,74960 ns$
$D(\lambda)$	$13,99682 \frac{ps}{km \times nm}$
$S(\lambda)$	$0,07554 \frac{ps}{km \times nm^2}$

Fuente: elaboración propia.

Estos parámetros indican en conjunto que, aunque existen efectos dispersivos, los valores están dentro de un rango manejable que hace posible la comunicación en este escenario. Con un diseño adecuado del sistema, incluyendo la compensación de dispersión y el manejo de la longitud de onda, es posible mantener una transmisión de datos eficiente y de alta calidad.

3.3. Ejercicios propuestos

1. Calcule el valor del coeficiente de atenuación (en dB/km) de un enlace de fibra óptica con 2 conectores de 0,1 dB y 70 empalmes de 0,05 dB que, al incidir una señal portadora con potencia óptica de 10 mW, entrega en el extremo final (100 km) una potencia de 0,23 mW.

2. Calcule el número de empalmes necesarios para obtener una potencia óptica a la salida del 2 % de la potencia de entrada en un sistema de 50 km de longitud. Se cuenta con dos conectores de 0,1 dB cada uno, un enlace de fibra óptica con coeficiente de atenuación de 0,6 dB/km, empalmes de 0,05 dB y un transmisor óptico que genera una señal de 10 mW.
3. Calcular la expresión de $S(\lambda)$ a partir de $D(\lambda)$ para cualquier longitud de onda.
4. ¿Cuál es el índice de refracción del núcleo del enlace de fibra óptica si, al transmitir con un transmisor óptico de variación de ancho espectral de 20 nm una señal con ancho temporal de entrada de 4 ns y una longitud de onda de 1.200 nm, se obtiene a la salida un pulso con ancho temporal de 12 ns y un valor de GVD cercano a $8 \text{ ps}^2/\text{km}$ después de 50 km?

Capítulo 4. Automodulación de fase (SPM)

La NLSE es la expresión utilizada para definir analíticamente los fenómenos lineales y no lineales presentes en un enlace de fibra óptica para pulsos de luz con una duración menor a 5 ps, tal y como se mostró en (1.5). Al carecer de solución analítica canónica, es posible resolver esta expresión mediante métodos numéricos y condiciones iniciales, o bien hacerlo analíticamente para un pulso de luz con comportamiento gaussiano:

$$j \frac{\partial \mathcal{K}}{\partial z} = -j \frac{\alpha}{2} \mathcal{K} + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \mathcal{K}}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \mathcal{K}}{\partial T^3} - \gamma |\mathcal{K}| \mathcal{K},$$

donde:

$$T = t - \frac{z}{v_g}, v_g = \frac{c}{n}.$$

4.1. Efecto Kerr eléctrico-óptico

Debido a los comportamientos no lineales de la fibra óptica bajo las condiciones descritas, el índice de refracción sufre una variación en función de la longitud de onda y de la potencia óptica de entrada. Este fenómeno se conoce como el efecto Kerr, el cual depende del coeficiente de refracción no lineal n_2 , que varía según el material del núcleo de la fibra. Este último parámetro se determina de acuerdo con el campo modal del enlace de fibra W_m , que para pulsos ultracortos se expresa como la relación entre la potencia óptica P_{in} y el área efectiva del enlace de fibra A_{eff} , como se muestra en (4.1) (Blaunstein *et al.*, 2020):

$$n = n_0 + n_2 \frac{P_{in}}{A_{eff}},$$

donde (4.1)

$$A_{eff} = \pi \frac{W_m^2}{4}.$$

Por otra parte, se tiene el coeficiente de no linealidad γ , que se entiende como la magnitud del efecto SPM y modela matemáticamente la no linealidad del sistema. Este parámetro depende de λ , n_2 y A_{eff} , tal y como se muestra en (4.2):

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}. \quad (4.2)$$

4.2. Efecto SPM en el dominio del tiempo

Para el caso de estudio, se considera la función $\mathcal{K}(0, t)$ en el dominio del tiempo como un pulso gaussiano con un factor adimensional de *chirp* C generado por el transmisor y con un ancho temporal de pulso T_1 , tal como se muestra en (4.3):

$$\mathcal{K}(0, t) = P_{in} \exp \left[-\frac{1+jC}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right]. \quad (4.3)$$

Para determinar la señal de salida del pulso, si bien se trata de un fenómeno no lineal, se hacen presentes de igual forma los fenómenos lineales de atenuación y dispersión en la solución del sistema ante una entrada gaussiana. Sin embargo, la dispersión, matemáticamente hablando, cambia la relación de T_1 con T_0 respecto a las condiciones lineales ya que influyen más variables y se introduce mayor susceptibilidad a la longitud de onda de operación.

Además, se consideran el efecto *chirp* en función de la longitud $C_1(z)$ y la TOD en (4.4) para el valor de $m=1$ en el caso de un pulso gaussiano de primer orden (De Prado *et al.*, 2019):

$$\mathcal{K}(z, t) = P_{in} \exp \left[-\frac{1+jC_1}{2} \left(\frac{t}{T_1} \right)^2 - \frac{\alpha z}{2} \right], \quad (4.4)$$

donde

$$T_1 = T_0 \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left[\frac{\beta_3 z}{2T_0^3} (1 + C_1(z)) \right]^2}$$

y

$$C_1(z) = C + (1 + C^2) \frac{\beta_2 z}{T_0^2}.$$

De este modo resulta (4.5) como expresión del pulso gaussiano que se obtiene a la salida:

$$\beta_3 = \frac{|\beta_2| T_0}{m f(m) \gamma P_{in} L_{eff}},$$

donde

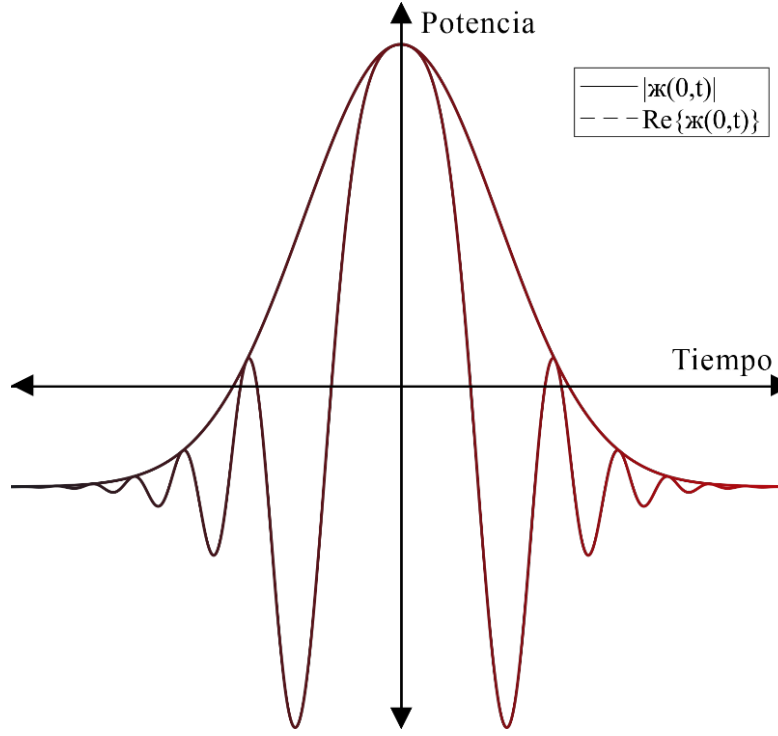
$$f(m) = 2 \left[1 - \frac{1}{2m} \right]^{1 - \frac{1}{2m}} \exp \left[\frac{1}{2m} - 1 \right] \quad (4.5)$$

y

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp[-\alpha z]}{\alpha}.$$

Debido a que el factor *chirp* se modela matemáticamente en el dominio de los números imaginarios, es necesario analizar el valor absoluto de la señal (sea $|\mathfrak{K}(0, t)|$) como la envolvente de la señal que permite observar el comportamiento gaussiano. Asimismo, es preciso evaluar la parte real de la señal ($Re\{\mathfrak{K}(0, t)\}$) para visualizar el comportamiento de los efectos de automodulación de fase producidos por GVD y TOD, tal y como se observa en la figura 16.

Figura 16. Propagación de pulsos de luz en el dominio del tiempo bajo efectos de atenuación, dispersión y SPM



Fuente: elaboración propia.

4.3. Efecto SPM en el dominio de la frecuencia

Para modelar el pulso de luz $K(0,t)$ en el dominio de la frecuencia, se recurre a la transformada de Fourier de (4.4). Así se obtiene $K(0,\omega)$ tal como se expresa en (4.6). Se debe observar que el factor $(\omega T_0)^2$ genera de igual forma un pulso gaussiano en el dominio de la frecuencia:

$$K(0,\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} K(0,t) e^{-j\omega t} dt$$

$$K(0,\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} P_{in} \exp \left[-\frac{1+jC}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \exp[-j\omega t] dt$$

$$K(0,\omega) = \frac{P_{in}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-t^2 \left[\frac{1+jC}{2T_0^2} \right] + t[j\omega] \right] dt.$$

Aplicando la identidad:

$$\int_{-\infty}^{\infty} H e^{-\mathcal{H}t^2 + \mathcal{L}t + \mathcal{I}} dt = H \sqrt{\frac{\pi}{\mathcal{H}}} \exp \left[\frac{\mathcal{L}^2}{4\mathcal{H}} + \mathcal{I} \right],$$

donde

$$H = \frac{P_{in}}{\sqrt{2\pi}}, \mathcal{H} = \frac{1+jC}{2T_0^2}, \mathcal{L} = j\omega, \mathcal{I} = 0.$$

Sustituyendo y ordenando la expresión, se obtiene entonces:

$$\mathcal{K}(0, \omega) = \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} \right]. \quad (4.6)$$

Con esto, para calcular el comportamiento en el dominio de la frecuencia de la señal, se considera la función de transferencia de la fibra óptica a partir de la NLSE, expandiendo con la serie de Taylor el factor $\beta(\omega)$ para obtener (4.7), que es la función de transferencia de la fibra óptica $H(z, \omega)$, con base en los elementos considerados en la ecuación no lineal de Schrödinger en (1.5):

$$H(z, \omega) \approx \exp \left[\frac{\alpha z}{2} + \frac{jz\beta_2}{2} (\omega - \omega_0)^2 + \frac{jz\beta_3}{6} (\omega - \omega_0)^3 \right],$$

donde (4.7)

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2 \ln[2](1+C^2)}}{T_0}.$$

Mediante el teorema de convolución, es posible expresar el pulso gaussiano $\mathcal{K}(z, \omega)$ como el producto de $\mathcal{K}(0, \omega)$ y $H(z, \omega)$, tal como se muestra en (4.8), y así obtener (4.9):

$$\mathcal{K}(z, \omega) = \mathcal{K}(0, \omega) H(z, \omega) \quad (4.8)$$

$$\mathcal{K}(z, \omega) = \left\{ \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} \right] \right\} \left\{ \exp \left[\frac{\alpha z}{2} + \frac{jz\beta_2}{2} (\omega - \omega_0)^2 + \frac{jz\beta_3}{6} (\omega - \omega_0)^3 \right] \right\}.$$

Aplicando la propiedad de multiplicación de exponentes:

$$\begin{aligned}\mathcal{K}(z, \omega) &= \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} + \frac{\alpha z}{2} + \frac{jz\beta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{jz\beta_3}{6}(\omega - \omega_0)^3 \right] \\ \mathcal{K}(z, \omega) &= \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} + \frac{\alpha z}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right].\end{aligned}\tag{4.9}$$

Ahora se procede a calcular la magnitud y la fase de la función de transferencia. Para la primera, se organiza la función en el dominio de la frecuencia de tal forma que se pueda aplicar la propiedad de la norma de una función compleja:

$$\begin{aligned}|\mathcal{K}(z, \omega)| &= \left| \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} + \frac{\alpha z}{2} + \frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right] \right| \\ |\mathcal{K}(z, \omega)| &= \left| \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \right| \left| \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} \right] \right| \left| \exp \left[\frac{\alpha z}{2} \right] \right| \left| \exp \left[\frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right] \right|.\end{aligned}$$

Aplicando la propiedad de la norma de una función compleja, se procede a calcular cada una de las normas que componen a la ecuación:

$$\begin{aligned}|f(z)g(z)h(z)| &= |f(z)||g(z)||h(z)| \\ \left| \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \right| &= \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{|1+jC|}} = \frac{P_{in}T_0}{\sqrt{\sqrt{1+C^2}}} = \frac{P_{in}T_0}{\sqrt[4]{1+C^2}} \\ \left| \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} \right] \right| &= \exp \left[\operatorname{Re} \left\{ -\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} \right\} \right] = \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+C^2)} \right] \\ \left| \exp \left[\frac{\alpha z}{2} \right] \right| &= \exp \left[\operatorname{Re} \left\{ \frac{\alpha z}{2} \right\} \right] = \exp \left[\frac{\alpha z}{2} \right]\end{aligned}$$

$$\left| \exp \left[\frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right] \right| \\ = \exp \left[\operatorname{Re} \left\{ \frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right\} \right] = 0$$

$$|\mathcal{K}(z, \omega)| = \frac{P_{in}T_0}{\sqrt[4]{1+C^2}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+C^2)} \right] \exp \left[\frac{\alpha z}{2} \right].$$

Por lo tanto, la expresión de magnitud resulta en:

$$|\mathcal{K}(z, \omega)| = \frac{P_{in}T_0}{\sqrt[4]{1+C^2}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+C^2)} + \frac{\alpha z}{2} \right]. \quad (4.10)$$

Ahora la función de fase se puede calcular organizando la expresión original para aplicar la propiedad del cálculo de fase de una función compleja, la cual permite sumar las funciones de fase de cada una de las componentes de la función de transferencia, para facilitar el proceso:

$$\Phi[f(z)g(z)h(z)] = \Phi[f(z)] + \Phi[g(z)] + \Phi[h(z)]$$

$$\Phi[\mathcal{K}(z, \omega)] = \Phi \left[\frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} + \frac{\alpha z}{2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right] \right]$$

$$\Phi \left[\frac{P_{in}T_0}{\sqrt{1+jC}} \right] = -\frac{1}{2} \tan^{-1}(C)$$

$$\Phi \left[\exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} + \frac{\alpha z}{2} + \frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right] \right]$$

$$-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+jC)} \frac{(1+jC)}{(1+jC)} = -\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+C^2)} + j \frac{(\omega T_0)^2 C}{2(1+C^2)}$$

$$\Phi \left[\exp \left[-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+C^2)} + j \frac{(\omega T_0)^2 C}{2(1+C^2)} + \frac{\alpha z}{2} + \frac{jz}{2} \left[\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3}(\omega - \omega_0)^3 \right] \right] \right]$$

$$\Phi \left[\exp \left[\left(-\frac{(\omega T_0)^2}{2(1+C^2)} + \frac{\alpha z}{2} \right) + j \left[\frac{(\omega T_0)^2 C}{2(1+C^2)} + \frac{z}{2} \left(\beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3} (\omega - \omega_0)^3 \right) \right] \right] \right]$$

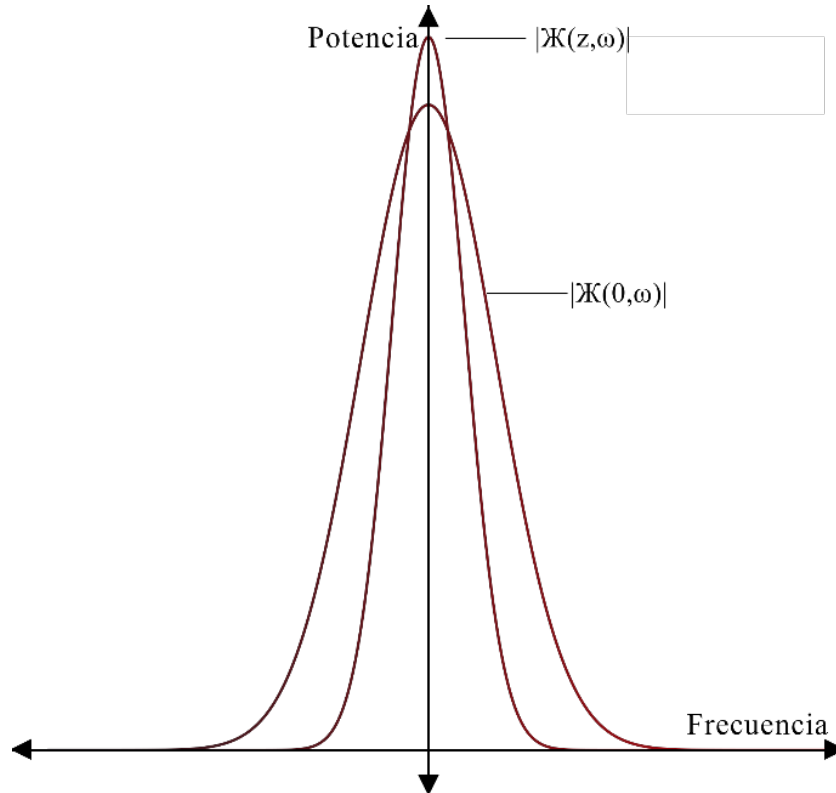
$$= \frac{(\omega T_0)^2 C}{2(1+C^2)} + \frac{z}{2} \left[\beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3} (\omega - \omega_0)^3 \right].$$

Por lo tanto, la expresión de fase queda expresada en:

$$\Phi[\mathcal{K}(z, \omega)] = -\frac{1}{2} \tan^{-1}(C) + \frac{C(\omega T_0)^2}{2(1+C^2)} + \frac{z}{2} \left[\beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3} (\omega - \omega_0)^3 \right]. \quad (4.11)$$

El comportamiento en el dominio de la frecuencia se observa en la figura 17, donde el espectro en frecuencia sufre una reducción en el ancho de banda y un aumento de energía para la frecuencia central.

Figura 17. Propagación de pulsos de luz en el dominio de la frecuencia bajo efectos de atenuación, dispersión y SPM



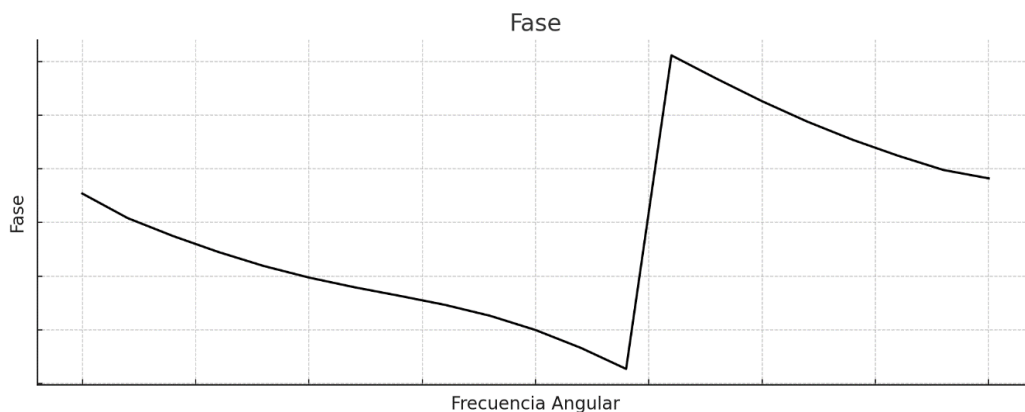
Fuente: elaboración propia.

El aumento de energía se da principalmente por la conservación de la energía, ya que la misma cantidad de energía se concentra en un ancho de banda menor, por lo que la amplitud máxima de la potencia de la onda aumenta en el dominio de la frecuencia. Por otra parte, la reducción del ancho espectral se da por los ya mencionados: efecto Kerr, GVD y TOD, ya que estos son los parámetros matemáticos que modelan la relación inversamente proporcional que poseen el tiempo y la frecuencia, también llamada incertidumbre tiempo-frecuencia.

El efecto Kerr muestra que la potencia de entrada puede provocar cambios en el índice de refracción del enlace de fibra óptica, alterando así la velocidad de propagación y generando el ensanchamiento temporal (y, en consecuencia, la comprensión del ancho espectral) de la señal transmitida. Por su parte, la TOD causa el fenómeno de chirrido dentro de la onda portadora, que matemáticamente se expresa como un término cúbico en las funciones de magnitud y fase en el dominio de la frecuencia, alterando de ese modo las formas de ondas en ambos dominios.

En la figura 18 se muestra el comportamiento de la fase de una señal óptica gaussiana con parámetros convencionales en un proceso de transmisión por fibra óptica bajo los efectos de SPM. Para una onda portadora generada en el transmisor, antes de ser transmitida, el diagrama de fase se modela como una función constante, ya que en la modulación OOK la fase de la señal portadora se mantiene constante, generalmente definida como 0. Sin embargo, debido a las condiciones propias del medio de transmisión, la onda sufre cambios en la fase de sus componentes frecuenciales, modelados matemáticamente como curvaturas, asimetrías, pendientes lineales y oscilaciones, debido a las características propias de los moduladores, codificadores, demoduladores y la fibra óptica utilizada.

Figura 18. Magnitud y fase de una señal gaussiana transmitida a lo largo de un enlace de fibra óptica bajo los efectos de SPM



Fuente: elaboración propia.

Así, el diagrama de fase permite entender cómo la señal se deforma a lo largo del enlace de fibra y el comportamiento de los componentes de frecuencia en función de los fenómenos lineales y no lineales. Por lo tanto, esta representación gráfica es una estrategia de control de distorsiones y diseño de sistemas optoelectrónicos en el momento de transmitir señales de esta naturaleza.

Es posible observar en la gráfica que la magnitud de la señal óptica en el dominio de la frecuencia es también una onda gaussiana, mientras que el diagrama de fase muestra un comportamiento diferente por la naturaleza de la función descrita en (4.11). Por otra parte, el parámetro GVD provoca cambios en la fase de la señal de manera cuadrática, creando una curvatura en el diagrama de fase que modela las distintas velocidades a las que viajan las frecuencias de la onda portadora en un enlace de fibra óptica.

La TOD, por su parte, genera una variación cúbica en la fase en relación con la frecuencia, generando asimetrías de tercer orden que alteran notablemente el comportamiento del diagrama de fase. En tanto el fenómeno de chirrido aumente la frecuencia con el paso del tiempo o la disminuya, introducirá pendientes lineales en la función de fase a medida que se propague la onda. Por ende, es importante minimizar el valor de C al diseñar el sistema de comunicaciones ya que, si el valor del chirrido tiende a cero ($C \rightarrow 0$), la fase únicamente se verá afectada por GVD y TOD, que a su vez se reducirán considerablemente si C tiende a cero.

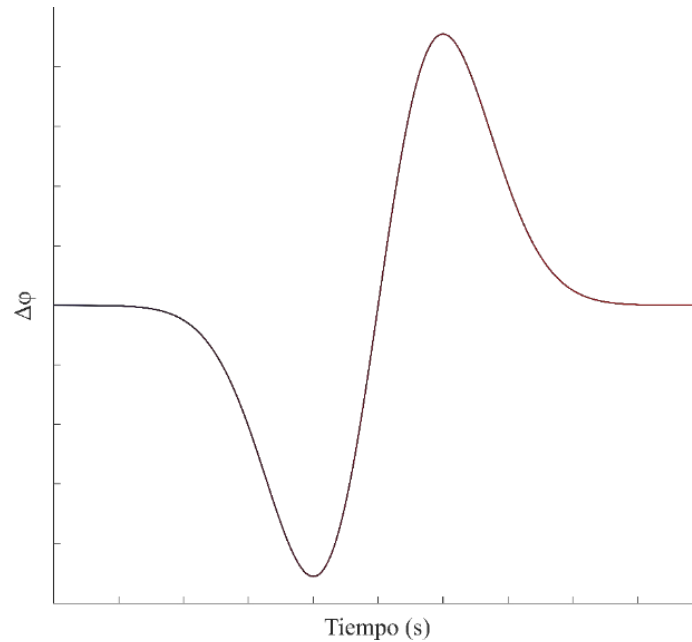
4.4. Cambio de frecuencia $\Delta\varphi$

El cambio de frecuencia permite cuantificar y analizar, en el dominio del tiempo, el comportamiento de la frecuencia a lo largo de la propagación. Este parámetro está dado por la razón de cambio de la potencia en el dominio del tiempo por el factor de no linealidad y en función de la longitud efectiva del enlace de fibra óptica L_{eff} (la distancia en donde la potencia óptica tiende a ser igual a P_{in}), es decir:

$$\Delta\varphi = \gamma L_{eff} \frac{\partial \mathcal{K}}{\partial t} = -\frac{\gamma L_{eff} P_{in} (1+jC_1)t}{T_1^2} \exp \left[-\frac{1+jC_1}{2} \left(\frac{t}{T_1} \right)^2 \right]. \quad (4.12)$$

En la figura 19 se representa el comportamiento típico del cambio de frecuencia para una señal gaussiana en un transmisor sin fenómeno de *chirp* de entrada.

Figura 19. Cambio de frecuencia debido a SPM para un pulso gaussiano



Fuente: elaboración propia.

4.5. Ejercicios resueltos de SPM

1. Un sistema de comunicaciones ópticas utiliza un transmisor que genera una señal láser con potencia óptica de entrada de 25 mW y ancho temporal de 2 ps. Además, opera con una longitud de onda de 1.550 nm y no posee factor de *chirp* de entrada. La onda portadora se envía a través de un enlace de fibra monomodo de 25 km con un diámetro de campo modal de 10 μm , un índice de no linealidad de $2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, un índice de refracción lineal de 1,33 y un coeficiente de atenuación de 0,23 dB/km. Calcular:

- GVD β_2 (en ps^2/km).
- TOD β_3 (en ps^3/km).
- Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace.
- Longitud efectiva del enlace (en km).
- Ancho temporal de salida T_1 (en ps).
- Potencia de salida (en mW).
- Coefficiente de no linealidad (en W^{-1}/km).

Solución

En primera instancia, se calcula la dispersión cromática con (3.7):

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234\lambda)} - 3.879e^{(-0,004427\lambda)}$$

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234(1.550))} - 3.879e^{(-0,004427(1.550))}$$

$$D(\lambda) \approx 21,61572 \frac{ps}{km \times nm}.$$

Con este dato, es posible calcular GVD con (3.6):

$$\beta_2 = -\frac{D(\lambda)}{2\pi c} n_c \lambda^2 = -\frac{(21,61572)}{2\pi(300 \times 10^3)} (1,33)(1.550)^2 = -36,64237 \text{ ps}^2/km.$$

Ahora bien, para obtener el valor de TOD, es necesario calcular en primera instancia el coeficiente de no linealidad. Para utilizar (4.2), hay que considerar las unidades en el Sistema Internacional (SI) y, finalmente, hacer la conversión necesaria para que este coeficiente quede expresado en W^{-1}/km :

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$$

$$\gamma = \frac{2\pi(2,7 \times 10^{-20})}{(1.550 \times 10^{-9}) \left(\frac{\pi}{4} (10 \times 10^{-6})^2 \right)} \cdot 10^3$$

$$\boxed{\gamma = 1,39355 \text{ W}^{-1}/km}.$$

Por otra parte, el coeficiente de atenuación del enlace de fibra óptica debe convertirse de decibels a decimal utilizando el factor de conversión visto en la sección 3.1.2:

$$\frac{\alpha}{10 \log e} = \frac{0,23 \text{ dB/km}}{10 \log e} = 0,052959 \frac{1}{km}.$$

Una vez realizada esta conversión, se utiliza (4.5) para calcular la longitud efectiva del enlace, el parámetro $f(m)$, el cual posee un valor definido para el pulso gaussiano ($m = 1$), y finalmente TOD. Nótese que, por la naturaleza de la ecuación, el parámetro TOD siempre es positivo:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha}$$

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp[-0,052959 \times 25]}{0,052959}$$

$$\boxed{L_{eff} = 22,12290 \text{ km}}.$$

Ahora se calcula el valor $f(m)$ para el pulso gaussiano:

$$f(m) = 2 \left[1 - \frac{1}{2m} \right]^{1 - \frac{1}{2m}} \exp \left[\frac{1}{2m} - 1 \right] = \sqrt{\frac{2}{e}} = 0,85776.$$

Luego se obtiene el valor de TOD para el escenario de comunicación planteado:

$$\beta_3 = \frac{|\beta_2| T_0}{m f(m) \gamma P_{in} L_{eff}}$$

$$\beta_3 = \frac{|-36,64237|(2)}{(1) \left(\sqrt{\frac{2}{e}} \right) (1,39355)(25)(22,12290)}$$

$$\boxed{\beta_3 = 0,11085 \text{ ps}^3/\text{km}}.$$

Ahora bien, para poder calcular el ancho temporal del pulso a la salida del enlace, se determina el factor de *chirp* instantáneo en función de la distancia con (4.4). Como el transmisor no genera *chirp*, el valor de C es cero:

$$C_1(z) = C + (1 + C^2) \frac{\beta_2 z}{T_0^2}$$

$$C_1(z) = \frac{(-36,64237)(25)}{(2)^2}$$

$$\boxed{C_1(z) = -229,01484}.$$

Con esto, es posible calcular T_1 , que se ve afectado notoriamente por la magnitud de $C_1(z)$, lo que arroja un ancho temporal 6.500 veces mayor al generado por el transmisor:

$$T_1 = T_0 \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left[\frac{\beta_3 z}{2T_0^3} (1 + C_1(z)) \right]^2}$$

$$T_1 = (2) \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left[\frac{(0,11085)(25)}{2(2)^3} (1 + (-229,01484)) \right]^2}$$

$$\boxed{T_1 = 12.847,313 \text{ ps}}.$$

Finalmente, para calcular la potencia de salida, se utiliza (3.1). Considerando que no mencionan conectores ni empalmes, $A(z)$ equivale únicamente al factor αz :

$$P_0(z) = P_{in} \exp \left[-\frac{\alpha z}{20 \log e} \right]$$

$$P_0(z) = (25) \exp \left[-\frac{(0,23)(25)}{20 \log e} \right]$$

$$\boxed{P_0(z) = 22,06552 \text{ mW}}.$$

2. Un sistema de comunicaciones ópticas utiliza un transmisor que genera una señal láser con potencia óptica de entrada de 5 mW y ancho temporal de 5 ps. Además, opera con una longitud de onda de 850 nm y posee factor de *chirp* de entrada de 0,5. La onda portadora se envía a través de un enlace de fibra monomodo de 50 km con un diámetro de campo modal de 10 μm , un índice de no linealidad de $2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, un índice de refracción lineal de 1,2 y un coeficiente de atenuación de 0,1 dB/km. Calcular:

- GVD β_2 (en ps^2/km).
- TOD β_3 (en ps^3/km).
- Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace.
- Longitud efectiva del enlace (en km).
- Ancho temporal de salida T_1 (en ps).
- Potencia de salida (en mW).
- Coeficiente de no linealidad (en W^{-1}/km).

Solución

En primera instancia, se calcula la dispersión cromática con (3.7):

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234\lambda)} - 3.879e^{(-0,004427\lambda)}$$

$$D(\lambda) \approx 0,6829e^{(0,00234(850))} - 3.879e^{(-0,004427(850))}$$

$$D(\lambda) \approx -85,06 \frac{ps}{km \times nm}.$$

Con este dato, es posible calcular GVD con (3.6):

$$\beta_2 = -\frac{D(\lambda)}{2\pi c} n_c \lambda^2 = -\frac{(-85,06)}{2\pi(300 \times 10^3)} (1,2)(850)^2 = 39,13 \text{ ps}^2/km.$$

Para obtener a su vez el valor de TOD, es necesario calcular en primera instancia el coeficiente de no linealidad. Para utilizar (4.2), hay que considerar las unidades en el SI y, finalmente, hacer la conversión necesaria para que este coeficiente quede expresado en W^{-1}/km :

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$$

$$\gamma = \frac{2\pi(2,7 \times 10^{-20})}{(850 \times 10^{-9}) \left(\frac{\pi}{4} (10 \times 10^{-6})^2 \right)} \cdot 10^3$$

$$\gamma = 2,5411 \text{ W}^{-1}/km.$$

Por otra parte, el coeficiente de atenuación del enlace de fibra óptica debe convertirse de decibels a decimal utilizando el factor de conversión visto en la sección 3.1.2:

$$\frac{\alpha}{10 \log e} = \frac{0,23 \text{ dB/km}}{10 \log e} = 0,023025 \frac{1}{km}.$$

Una vez realizada esta conversión, se utiliza (4.5) para calcular la longitud efectiva del enlace, el parámetro $f(m)$, el cual posee un valor definido para el pulso gaussiano ($m = 1$), y finalmente TOD. Nótese que, por la naturaleza de la ecuación, el parámetro TOD siempre es positivo:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha}$$

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp[-0,023025 \times 50]}{0,023025}$$

$$\boxed{L_{eff} = 44,94 \text{ km}}.$$

Ahora se calcula el valor $f(m)$ para el pulso gaussiano:

$$f(m) = 2 \left[1 - \frac{1}{2m} \right]^{1 - \frac{1}{2m}} \exp \left[\frac{1}{2m} - 1 \right] = \sqrt{\frac{2}{e}} = 0,85776.$$

Luego se obtiene el valor de TOD para el escenario de comunicación planteado:

$$\beta_3 = \frac{|\beta_2| T_0}{m f(m) \gamma P_{in} L_{eff}}$$

$$\beta_3 = \frac{|39,13|(5)}{(1) \left(\sqrt{\frac{2}{e}} \right) (2,5411)(5)(44,94)}$$

$$\boxed{\beta_3 = 0,3993 \text{ ps}^3/\text{km}}.$$

Para poder calcular el ancho temporal del pulso a la salida del enlace, se determina el factor de *chirp* instantáneo en función de la distancia con (4.4). Como el transmisor tiene un factor *chirp* de entrada de 0,5:

$$C_1(z) = C + (1 + C^2) \frac{\beta_2 z}{T_0^2}$$

$$C_1(z) = (0,5) + (1 + 0,5^2) \frac{(39,13)(50)}{(5)^2}$$

$$\boxed{C_1(z) = 98,31}.$$

Con esto, es posible calcular T_1 , que se ve afectado notoriamente por la magnitud de $C_1(z)$, la cual arroja un ancho temporal 20 veces mayor al generado por el transmisor:

$$T_1 = T_0 \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left[\frac{\beta_3 z}{2T_0^3} (1 + C_1(z)) \right]^2}$$

$$T_1 = (5) \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left[\frac{(0,3993)(50)}{2(5)^3} (1 + (98,31)) \right]^2}$$

$$\boxed{T_1 = 99,34 \text{ ps}}.$$

Para calcular finalmente la potencia de salida, se utiliza (3.1). Considerando que no se mencionan conectores ni empalmes, $A(z)$ equivale únicamente al factor αz :

$$P_0(z) = P_{in} \exp \left[-\frac{\alpha z}{20 \log e} \right]$$

$$P_0(z) = (25) \exp \left[-\frac{(0,1)(50)}{20 \log e} \right]$$

$$\boxed{P_0(z) = 4,485 \text{ mW}}.$$

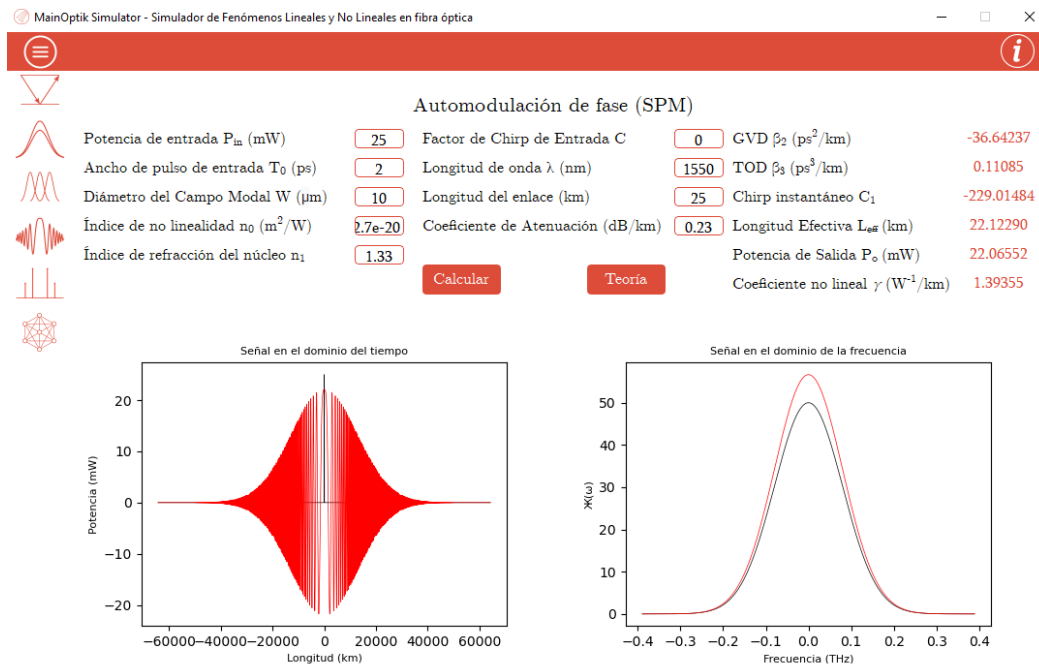
4.6. Simulación del efecto SPM en MainOptik Simulator

En la figura 20 se muestra la ventana correspondiente a la automodulación de fase, la cual toma nueve datos de entrada para hacer los cálculos correspondientes a las ecuaciones descritas en esta sección. Para el parámetro n_0 , que se escribe en el SI, se utiliza la notación exponencial. Por ejemplo, si el valor por escribir es $1,03 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$, en el software se escribe $1,03e-19$. El programa entrega como salidas numéricas la GVD en función de la longitud de onda, TOD, el *chirp* instantáneo C_1 , la longitud efectiva, la potencia de salida y el coeficiente no lineal. También se genera una ventana que grafica la variación de frecuencia respecto al tiempo.

Para este ejemplo, se utilizan los siguientes valores: potencia de entrada $P_{in} = 25 \text{ mW}$; ancho de pulso de entrada $T_0 = 2 \text{ ps}$; diámetro del campo modal $W_m = 10 \text{ }\mu\text{m}$; índice de no linealidad $n_0 = 2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; índice de refracción del núcleo $n_c = 1,33$; factor de *chirp* de entrada $C = 0$; longitud de onda $\lambda = 1.550 \text{ nm}$; longitud del enlace $z = 25 \text{ km}$; y coeficiente de atenuación $\alpha = 0,23 \text{ dB/km}$.

La tabla 6 presenta los resultados del conjunto de parámetros clave que afectan la transmisión de señales ópticas en un sistema de fibra óptica ante la automodulación de fase. Por una parte, el hecho de que β_2 sea negativo indica que la fibra utilizada es altamente dispersiva anómala, donde los componentes de mayor longitud de onda se propagan más rápido que los de menor longitud de onda. Esta elevada dispersión puede causar un ensanchamiento significativo de los pulsos a lo largo de la fibra, afectando la calidad de la señal. Por otra parte, el valor de β_3 sugiere una variación no lineal de la dispersión con la longitud de onda. Un parámetro de esta magnitud también contribuye al ensanchamiento y distorsión de los pulsos en sistemas que operan con un amplio espectro de longitudes de onda.

Figura 20. Módulo de SPM en MainOptik Simulator para el escenario de comunicación



Fuente: elaboración propia.

Entretanto, C_1 , al ser negativo, muestra que las oscilaciones en el dominio del tiempo comienzan en su valor máximo y se reducen en el extremo del pulso, y su magnitud muestra que la variación de fase del pulso es muy alta, distorsionando el pulso gaussiano a tal punto de poder generar confusiones en el demodulador. Este parámetro, aunque no se especifica su unidad en la tabla, puede estar relacionado con la curvatura de la dispersión o alguna constante específica del sistema.

Asimismo, la longitud efectiva L_{eff} es aquella a la cual los efectos no lineales son significativos debido a la atenuación de la fibra. De este modo, un resultado alto en este parámetro puede implicar una mayor interacción no lineal a lo largo de la fibra. Finalmente, la potencia de salida P_0 muestra que no hubo pérdidas significativas por atenuación, pero es un valor elevado que afecta al coeficiente de linealidad y explica la aparición de la automodulación de fase y el efecto Kerr.

Tabla 6. Resultados de SPM para el escenario de comunicación

Parámetro	Valor
β_2	$-36,64237 \text{ ps}^2/\text{km}$
β_3	$0,11085 \text{ ps}^3/\text{km}$
C_1	$-229,01484$
L_{eff}	$22,12290 \text{ km}$
P_0	$22,06552 \text{ mW}$
γ	$1,39355 \text{ W}^{-1}/\text{km}$

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la constante de no linealidad γ indica una alta susceptibilidad a los efectos no lineales en la fibra. Estos parámetros sugieren un entorno de transmisión desafiante, con alta dispersión y efectos no lineales significativos, por lo que se hace necesario un ajuste en los parámetros del sistema para obtener mejores resultados.

4.7. Ejercicios propuestos

1. Demostrar que el cambio de frecuencia $\Delta\phi$ para un pulso gaussiano con factor *chirp* está dado por (4.12).
2. Un sistema de comunicaciones ópticas utiliza un transmisor que genera una señal láser con potencia óptica de entrada de 25 mW y ancho temporal de 3 ps. Además, opera con una longitud de onda de 1.320 nm y posee un factor de *chirp* de entrada 4. La onda portadora se envía a través de un enlace de fibra monomodo de 50 km con un diámetro de campo modal de

10 μm , un índice de no linealidad de $2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, un índice de refracción lineal de 1,42 y un coeficiente de atenuación de 0,8 dB/km. También cuenta con 70 empalmes de 0,1 dB y 2 conectores de 0,5 dB. Calcular:

- a) GVD β_2 (en ps^2/km).
- b) TOD β_3 (en ps^3/km).
- c) *Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace.
- d) Longitud efectiva del enlace (en km).
- e) Ancho temporal de salida T_1 (en ps).
- f) Potencia de salida (en mW).
- g) Coeficiente de no linealidad (en W^{-1}/km).

3. Un sistema de comunicaciones ópticas utiliza un transmisor que genera una señal láser con potencia óptica de entrada de 10 mW y ancho temporal de 1 ps. Además, opera con una longitud de onda de 1.310 nm y posee un factor de *chirp* de entrada 0. La onda portadora se envía a través de un enlace de fibra monomodo de 45 km con un diámetro de campo modal de 9,5 μm , un índice de no linealidad de $2,8 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, un índice de refracción lineal de 1,44 y un coeficiente de atenuación de 0,75 dB/km. También cuenta con 60 empalmes de 0,1 dB y 3 conectores de 0,4 dB. Calcular:

- a) GVD β_2 (en ps^2/km).
- b) TOD β_3 (en ps^3/km).
- c) *Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace.
- d) Longitud efectiva del enlace (en km).
- e) Ancho temporal de salida T_1 (en ps).
- f) Potencia de salida (en mW).
- g) Coeficiente de no linealidad (en W^{-1}/km).

4. Un sistema de comunicaciones ópticas utiliza un transmisor que genera una señal láser con potencia óptica de entrada de 8 mW y ancho temporal de 2,8 ps. Además, opera con una longitud de onda de 1.330 nm y posee un factor de *chirp* de entrada de -40. La onda portadora se envía a través de un enlace de fibra monomodo de 200 km con un diámetro de campo modal de 10,5 μm , un índice de no linealidad de $2,8 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, un índice de refracción lineal de 1,5 y un coeficiente de atenuación de 0,82 dB/km. También cuenta con 8 empalmes de 0,3 dB y 2 conectores de 0,6 dB. Calcular:

- a) GVD β_2 (en ps^2/km).
- b) TOD β_3 (en ps^3/km).
- c) *Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace.
- d) Longitud efectiva del enlace (en km).
- e) Ancho temporal de salida T_1 (en ps).
- f) Potencia de salida (en mW).
- g) Coeficiente de no linealidad (en W^{-1}/km).

Capítulo 5. Mezcla de cuarta onda y evaluación de sistemas ópticos

5.1. Mezcla de cuarta onda (FWM)

La FWM es un fenómeno no lineal que surge en sistemas de comunicaciones con fibra óptica multimodales que usan componentes de multiplexación para transmitir varios pulsos gaussianos en el dominio del tiempo. El concepto indica que, al transmitir tres ondas a través de un multiplexor y enviarlas por un enlace de fibra óptica, la interacción entre ellas genera una cuarta señal que posee un espectro compuesto por la combinación lineal de las frecuencias lineales.

Este fenómeno causa que las señales en el dominio del tiempo generen interferencias significativas y ruido óptico provocado por el propio sistema cuando la nueva señal se solapa con las originales. A su vez, en el dominio de la frecuencia, se presentan componentes espectrales no deseados que aumentan el ancho de banda y deforman las señales originales al ocupar su ancho de banda y amplificar el ruido. Este fenómeno disminuye notablemente la relación señal a ruido óptico y limita la capacidad del canal de comunicación. La mezcla de cuarta onda aparece y afecta pronunciadamente en sistemas ópticos de alta potencia multicanal con separación de ancho espectral muy pequeño.

A pesar de las afecciones que genera la FWM, existen técnicas que pueden mitigar su efecto en este tipo de escenarios de transmisión. Una de las más efectivas es la optimización del espaciamiento de la longitud de onda central de cada canal en los sistemas WDM para reducir la posibilidad de interacción entre canales. Además, conociendo el comportamiento matemático de la constante de no linealidad, es posible ajustar los parámetros del sistema de comunicaciones para que este valor tienda a cero y así mitigar el impacto no solo de FWM, sino también de SPM. Por lo tanto, es importante considerar estas variables para asegurar una transmisión de datos eficiente y de alta calidad.

Para tres componentes frecuenciales en un canal óptico ($N = 3$), estas señales al mezclarse forman diferentes componentes armónicos por intermodulación (Keiser, 2010). El número de armónicos M generados por la fibra bajo las condiciones de la NLSE expresada en (1.2) está dado por:

$$M = \frac{N^2}{2}(N - 1). \quad (5.1)$$

Con $N = 3$, con potencias ópticas P_i, P_j, P_k en un sistema WDM, es posible calcular las nuevas longitudes de onda para cada uno de los armónicos a partir del siguiente grupo de ecuaciones ordenadas:

$$\lambda_{112} = 2\lambda_1 - \lambda_2. \quad (5.2)$$

$$\lambda_{113} = 2\lambda_1 - \lambda_3. \quad (5.3)$$

$$\lambda_{123} = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3. \quad (5.4)$$

$$\lambda_{132} = \lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2. \quad (5.5)$$

$$\lambda_{221} = 2\lambda_2 - \lambda_1. \quad (5.6)$$

$$\lambda_{223} = 2\lambda_2 - \lambda_3. \quad (5.7)$$

$$\lambda_{231} = \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1. \quad (5.8)$$

$$\lambda_{331} = 2\lambda_3 - \lambda_1. \quad (5.9)$$

$$\lambda_{332} = 2\lambda_3 - \lambda_2. \quad (5.10)$$

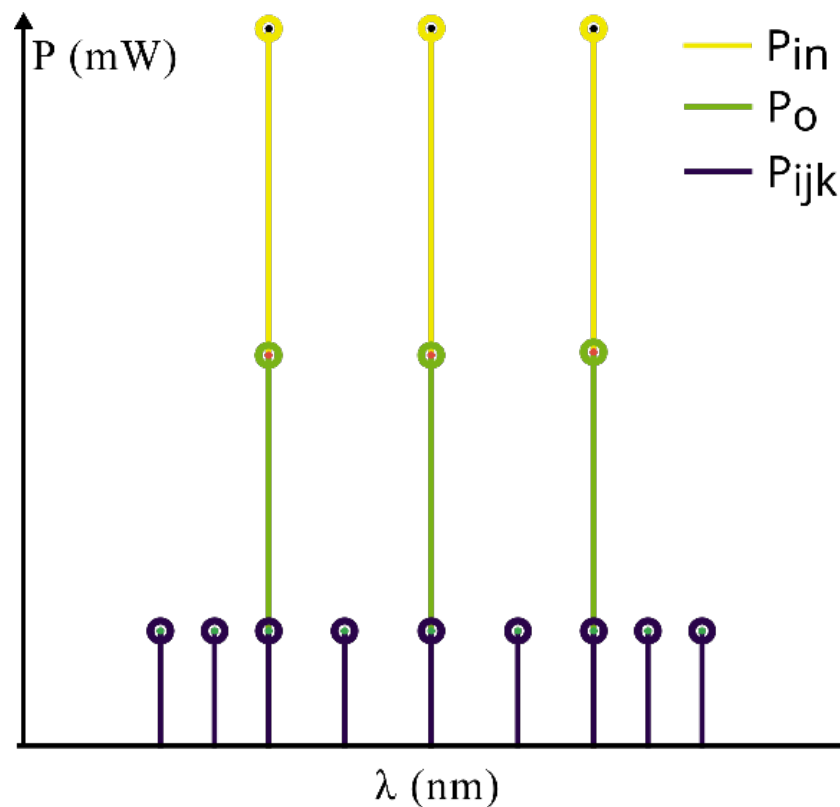
La potencia óptica de cada uno de los armónicos generados está dada por (5.11), donde d_{ijk} es el factor de degeneración de la fibra y η es la eficiencia FWM del sistema de comunicaciones (Gómez *et al.*, 2015a):

$$P_{ijk} = \eta(P_i P_j P_k) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{ijk} A_{eff}} L_{eff} \right]^2. \quad (5.11)$$

Por otra parte, el coeficiente de no linealidad gamma depende de la longitud de onda, por lo que debe recalcularse para cada una de las longitudes de onda de los armónicos. En ocasiones, la magnitud de la potencia óptica de los armónicos generados puede ser equiparable

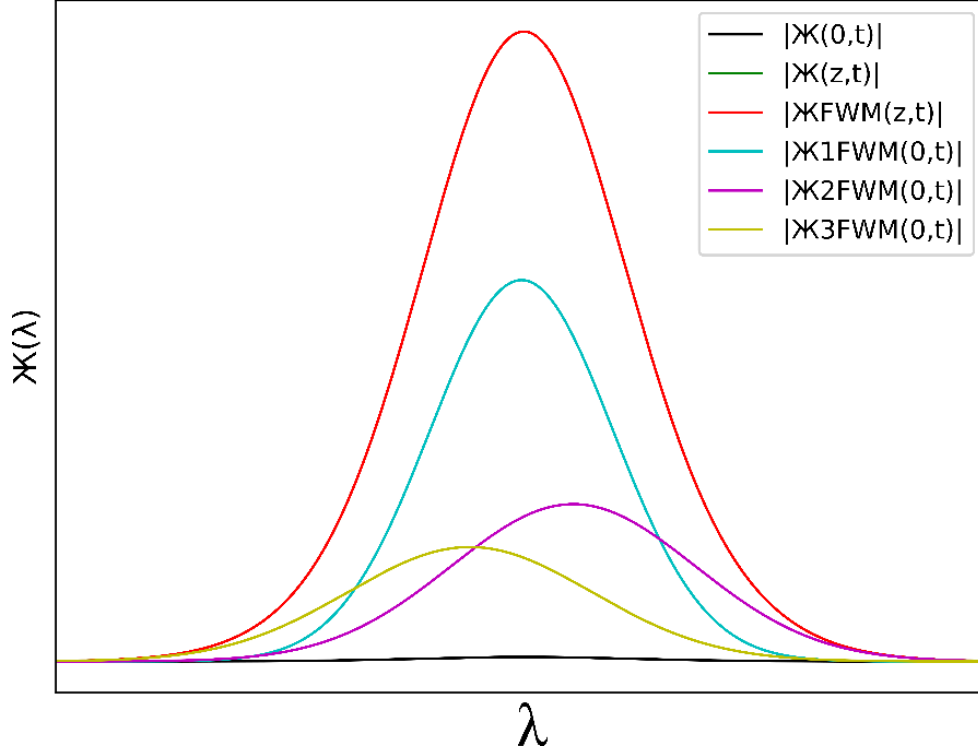
a la potencia del transmisor, lo que ocasiona errores en el receptor debido a la distorsión que ejercen estas señales, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, donde alteran el ancho de banda total de la señal transmitida, la relación señal a ruido, y la densidad espectral de cada uno de los canales que contienen información en un sistema WDM (Gómez *et al.*, 2015b). En la figura 21 se visualizan los componentes frecuenciales que actúan en un sistema WDM bajo FWM.

Figura 21. Fenómeno FWM en el dominio de la longitud de onda



Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, en la figura 22 se visualiza el fenómeno de FWM para un pulso gaussiano en el dominio de la frecuencia, donde cada uno de los armónicos altera el espectro de la señal de salida junto con los demás fenómenos lineales y no lineales.

Figura 22. Fenómeno FWM para un pulso gaussiano


Fuente: elaboración propia.

5.2. Relación señal a ruido óptico (OSNR)

Para evaluar el parámetro OSNR, se recurre a (5.12), donde PFWM corresponde a la potencia de los armónicos generados a la misma longitud de onda central de operación del sistema WDM. Este parámetro se mide en decibeles y permite observar la calidad de la señal transmitida a la salida del enlace de fibra óptica (Singh *et al.*, 2020):

$$OSNR_{ijk} = 10 \log \left[\frac{P_{ijk}}{NFWM_{ijk}} \right]. \quad (5.12)$$

El ruido generado en el sistema NFWM está dado por la relación entre PFWM, la potencia de los armónicos P_{ijk} y la eficiencia espectral del sistema b :

$$NFWM_{ijk} = 2b^2 P_{ijk} \left[\frac{PFWM}{8} \right]. \quad (5.13)$$

5.3. Criterio de potencia de entrada para evitar SPM

La potencia de entrada de un canal en un sistema FWM debe cumplir la condición dada en (5.14) para evitar que se genere un valor considerable de efecto *chirp* y se produzcan errores en la transmisión. En este caso, N_A es el número de amplificadores utilizados en el sistema de comunicación (Alifdal *et al.*, 2017):

$$P_{in} = \frac{0,1\alpha}{\gamma N_A}. \quad (5.14)$$

5.4. Ejercicios resueltos de FWM

1. Calcular la potencia óptica de los armónicos generados por un transmisor WDM con potencia óptica de 15 mW para tres canales con una longitud de onda de operación de 1.549,5, 1.550 y 1.550,5 nanómetros respectivamente. El sistema cuenta con un factor de degeneración de la fibra d_{ijk} de 3, una eficiencia η de 0,7, coeficiente de atenuación de 0,5 dB/km, una longitud de enlace de 50 km, anchura de campo modal de 10 μm , coeficiente de no linealidad de $2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ y un índice de refracción en el núcleo de 1,5.

Solución

En principio, se deben calcular las longitudes de onda de cada uno de los armónicos generados por el transmisor en las condiciones dadas. Para ese fin se utiliza el grupo de ecuaciones descrito en la presente sección:

$$\lambda_{112} = 2\lambda_1 - \lambda_2 = 1.549 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{113} = 2\lambda_1 - \lambda_3 = 1.548,5 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{123} = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 = 1.549 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{132} = \lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2 = 1.550 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{221} = 2\lambda_2 - \lambda_1 = 1.550,5 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{223} = 2\lambda_2 - \lambda_3 = 1.549,5 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{231} = \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1 = 1.551 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{331} = 2\lambda_3 - \lambda_1 = 1.551,5 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{332} = 2\lambda_3 - \lambda_2 = 1.551 \text{ nm.}$$

Una vez calculadas estas longitudes de onda, se procede a determinar el área y la longitud efectivas del enlace de fibra óptica con (4.1) y (4.5), considerando que estos valores se expresan según el SI:

$$A_{eff} = \pi \frac{W_m^2}{4}$$

$$A_{eff} = \pi \frac{(10)^2}{4}$$

$$A_{eff} = 7,85398 \times 10^{-11} \text{ m}^2.$$

Para calcular la longitud efectiva, se debe convertir el coeficiente de atenuación a escala decimal:

$$\frac{\alpha}{10 \log e} = \frac{0,5 \text{ dB/km}}{10 \log e} = 0,11513 \frac{1}{\text{km}}.$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha}$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-(0,11513)(100)}}{0,11513} = 8,6858 \times 10^3 \text{ m.}$$

Con este valor, se procede a calcular con (5.11) la potencia óptica de los armónicos, considerando los parámetros anteriormente obtenidos según el SI:

$$P_{ijk} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{ijk} A_{eff}} L_{eff} \right]^2.$$

$$P_{112} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{112}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{112} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 297,064 \text{ } \mu\text{W}.$$

$$P_{113} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{113}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{113} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 297,256 \text{ } \mu\text{W}.$$

$$P_{123} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{123} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 297,064 \mu W.$$

$$P_{132} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{132} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 296,680 \mu W.$$

$$P_{221} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{221} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 296,489 \mu W.$$

$$P_{223} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{223} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 296,872 \mu W.$$

$$P_{231} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{231} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 296,298 \mu W.$$

$$P_{331} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{331} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 296,107 \mu W.$$

$$P_{332} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{332} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 296,298 \mu W.$$

2. Calcular la potencia óptica de los armónicos generados por un transmisor WDM con potencia óptica de 25 mW y 5 ps para tres canales con una longitud de onda de operación de 1.599,1, 1.600 y 1.600,9 nanómetros respectivamente. El sistema cuenta con un factor de degeneración de la fibra d_{ijk} de 3, una eficiencia η de 0,8, una eficiencia espectral de 0,7, coeficiente de atenuación de 0,1 dB/km, una longitud de enlace de 50 km, anchura de campo modal de 10 μm , coeficiente de no linealidad de $2,7 \times 10^{-20} m^2/W$ y un índice de refracción en el núcleo de 1,33. Determinar también NFWM y OSNR para cada canal. Por otra parte, el sistema no posee *chirp* de entrada, utiliza dos conectores con pérdida de 0,1 dB cada uno, y posee 5 empalmes de fusión con pérdidas de 0,1 dB cada uno.

Solución

En principio, se deben calcular las longitudes de onda de cada uno de los armónicos generados por el transmisor en las condiciones dadas. Para ese fin se utiliza el grupo de ecuaciones descrito en la presente sección:

$$\lambda_{112} = 2\lambda_1 - \lambda_2 = 1.598,2 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{113} = 2\lambda_1 - \lambda_3 = 1.597,3 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{123} = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 = 1.598,2 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{132} = \lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2 = 1.600 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{221} = 2\lambda_2 - \lambda_1 = 1.600,9 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{223} = 2\lambda_2 - \lambda_3 = 1.599,1 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{231} = \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1 = 1.601,8 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{331} = 2\lambda_3 - \lambda_1 = 1.602,7 \text{ nm.}$$

$$\lambda_{332} = 2\lambda_3 - \lambda_2 = 1.601,8 \text{ nm.}$$

Una vez calculadas estas longitudes de onda, se procede a determinar el área y la longitud efectivas del enlace de fibra óptica con (4.1) y (4.5), considerando que estos valores se expresan según el SI:

$$A_{eff} = \pi \frac{W_m^2}{4}$$

$$A_{eff} = \pi \frac{(10)^2}{4}$$

$$\boxed{A_{eff} = 7,85398 \times 10^{-11} \text{ m}^2}.$$

Para calcular la longitud efectiva, se debe convertir el coeficiente de atenuación a escala decimal:

$$\frac{\alpha}{10 \log e} = \frac{0,1 \text{ dB/km}}{10 \log e} = 0,02302 \frac{1}{\text{km}}.$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha}$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-(0,02302)(50)}}{0,02302} = 29,69 \times 10^3 \text{ m}.$$

Con este valor, se procede a calcular con (5.11) la potencia óptica de los armónicos, considerando los parámetros anteriormente obtenidos según el SI:

$$P_{ijk} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{ijk} A_{eff}} L_{eff} \right]^2.$$

$$P_{112} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{112}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{112} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,79 \mu W.$$

$$P_{113} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{113}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{113} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,88 \mu W.$$

$$P_{123} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{123}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{123} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,79 \mu W.$$

$$P_{132} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{132}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{132} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,59 \mu W.$$

$$P_{221} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{221}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{221} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,489 \mu W.$$

$$P_{223} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{223}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{223} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,692 \mu W.$$

$$P_{231} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{231}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{231} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,398 \mu W.$$

$$P_{331} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{331} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,302 \mu W.$$

$$P_{332} = \eta(P_1 P_2 P_3) \exp \left[-\frac{\alpha z}{2} \right] \left[\frac{d_{ijk}}{3} \frac{2\pi n_0}{\lambda_{332} A_{eff}} L_{eff} \right]^2 = 173,399 \mu W.$$

Ahora se calcula la relación señal a ruido óptico con (5.12) y (5.13):

$$NFWM_1 = 2b^2 P_{ijk} \left[\frac{P_{FWM}}{8} \right] = 17,22 \mu W.$$

$$NFWM_2 = 2b^2 P_{ijk} \left[\frac{P_{FWM}}{8} \right] = 17,22 \mu W.$$

$$NFWM_3 = 2b^2 P_{ijk} \left[\frac{P_{FWM}}{8} \right] = 17,22 \mu W.$$

$$OSNR_1 = 10 \log \left[\frac{P_{ijk}}{NFWM_{ijk}} \right] = 28,76 \text{ dB}.$$

$$OSNR_2 = 10 \log \left[\frac{P_{ijk}}{NFWM_{ijk}} \right] = 28,76 \text{ dB}.$$

$$OSNR_3 = 10 \log \left[\frac{P_{ijk}}{NFWM_{ijk}} \right] = 28,76 \text{ dB}.$$

5.5. Simulación del efecto FWM en MainOptik Simulator

En la figura 23 se muestra la ventana correspondiente al módulo de mezcla de cuarta onda, que se puede comprender como la combinación de todos los presaberes descritos en el libro. En este caso se toman 22 datos de entrada para hacer los cálculos correspondientes a las ecuaciones descritas en esta sección. Así, el programa entrega como salidas numéricas la GVD en función de la longitud de onda, TOD, el *chirp* instantáneo C_1 , la potencia de salida, el coeficiente no lineal, la OSNR y el NFWM, para cada uno de los canales y el área y la longitud efectivas.

Figura 23. Módulo de FWM en MainOptik Simulator para el escenario de comunicación

MainOptik Simulator - Simulador de Fenómenos Lineales y No Lineales en fibra óptica

Mezcla de Cuarta Onda (FWM)

Canal 1	Canal 2	Canal 3
Potencia de entrada (mW) 20	Potencia de entrada (mW) 20	Potencia de entrada (mW) 20
Longitud de onda λ (nm) 1549.8	Longitud de onda λ (nm) 1550	Longitud de onda λ (nm) 1550.2
Ancho de pulso de entrada T_0 (ps) 3	Ancho de pulso de entrada T_0 (ps) 4	Ancho de pulso de entrada T_0 (ps) 2

Otros parámetros

Diámetro Campo Modal W (μm) 10	Factor de Chirp de Entrada C 0	Eficiencia espectral b 0.7
Índice de no linealidad n_0 (m^2/W) 2.7e-20	Longitud del enlace (km) 20	Eficiencia FWM η 1
Índice de refracción del núcleo n_1 1.48	Coefficiente de Atenuación (dB/km) 0.21	Factor de degeneración d_{ijk} 6
Número de conectores 2	Atenuación de conector (dB) 0.1	Número de empalmes 30

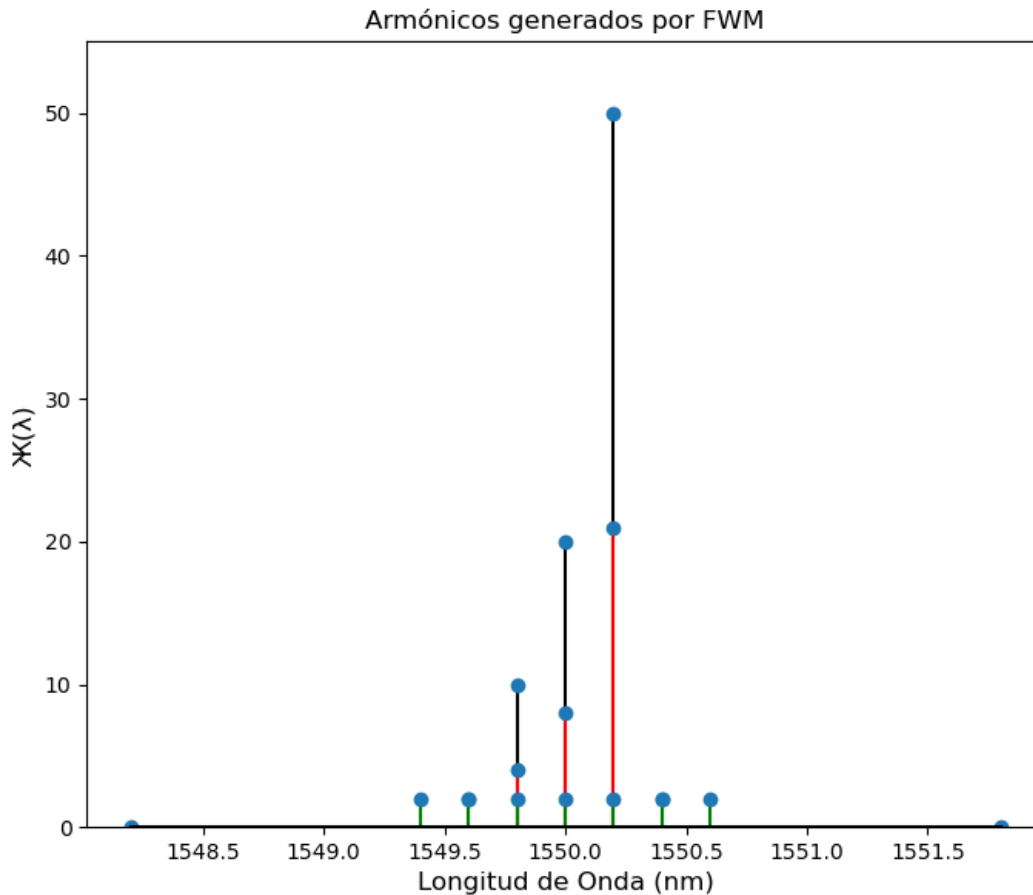
Potencia de salida 1 (mW) 8.53159	Ancho del pulso T_1 1 (ps) 2567.41227	Dispersión D 1 ($\text{ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$) 21.60011
Potencia de salida 2 (mW) 8.53159	Ancho del pulso T_1 2 (ps) 611.30603	Dispersión D 2 ($\text{ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$) 21.61572
Potencia de salida 3 (mW) 8.53159	Ancho del pulso T_1 3 (ps) 19614.42903	Dispersión D 3 ($\text{ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$) 21.63133
GVD β_2 1 (ps^2/km) -40.73501	Chirp instantáneo C_1 1 -90.52224	NWFM 1 (μW) 1.94282
GVD β_2 2 (ps^2/km) -40.77497	Chirp instantáneo C_1 2 -50.96872	NWFM 2 (μW) 1.94282
GVD β_2 3 (ps^2/km) -40.81496	Chirp instantáneo C_1 3 -204.07478	NWFM 3 (μW) 1.94282
TOD β_3 1 (ps^3/km) 0.39874	OSNR 1 (dB) 36.42598	Coefficiente γ (W^{-1}/km) 1.39355
TOD β_3 2 (ps^3/km) 0.53224	OSNR 2 (dB) 36.42598	Área Efectiva A_{eff} (μm^2) 78.53982
TOD β_3 3 (ps^3/km) 0.26642	OSNR 3 (dB) 36.42598	Longitud Efectiva L_{eff} (km) 12.81811

Fuente: elaboración propia.

Para este ejemplo, se utilizan los siguientes valores: potencia de entrada para los tres canales $P_{i,j,k} = 20 \text{ mW}$; longitud de onda 1 $\lambda_1 = 1.549,8 \text{ nm}$; longitud de onda 2 $\lambda_2 = 1.550 \text{ nm}$; longitud de onda 3 $\lambda_3 = 1.550,2 \text{ nm}$; ancho de pulso de entrada 1 $T_{0,1} = 3 \text{ ps}$; ancho de pulso de entrada 2 $T_{0,2} = 4 \text{ ps}$; ancho de pulso de entrada 3 $T_{0,3} = 2 \text{ ps}$; diámetro del campo modal $W = 10 \mu\text{m}$; índice de no linealidad $n_0 = 2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; índice de refracción del núcleo $n_c = 1,48$; factor de *chirp* de entrada $C = 0$; longitud del enlace $z = 20 \text{ km}$; coeficiente de atenuación $\alpha = 0,21 \text{ dB/km}$; número de conectores $IO = 2$; atenuación de cada conector $IO_{\text{dB}} = 0,1 \text{ dB}$; número de empalmes $E = 30$; atenuación de cada empalme $E_{\text{dB}} = 0,1 \text{ dB}$; eficiencia espectral $b = 0,7$; eficiencia FWM $\eta = 1$; y factor de degeneración $d_{ijk} = 6$.

De esta forma, el software genera una ventana que grafica las componentes frecuenciales de la transmisión de forma discreta, como se muestra en la figura 24. Adicionalmente, hace lo mismo para la transmisión de forma continua, según se observa en la figura 25.

Figura 24. Gráfica de armónicos generados por FWM en MainOptik Simulator

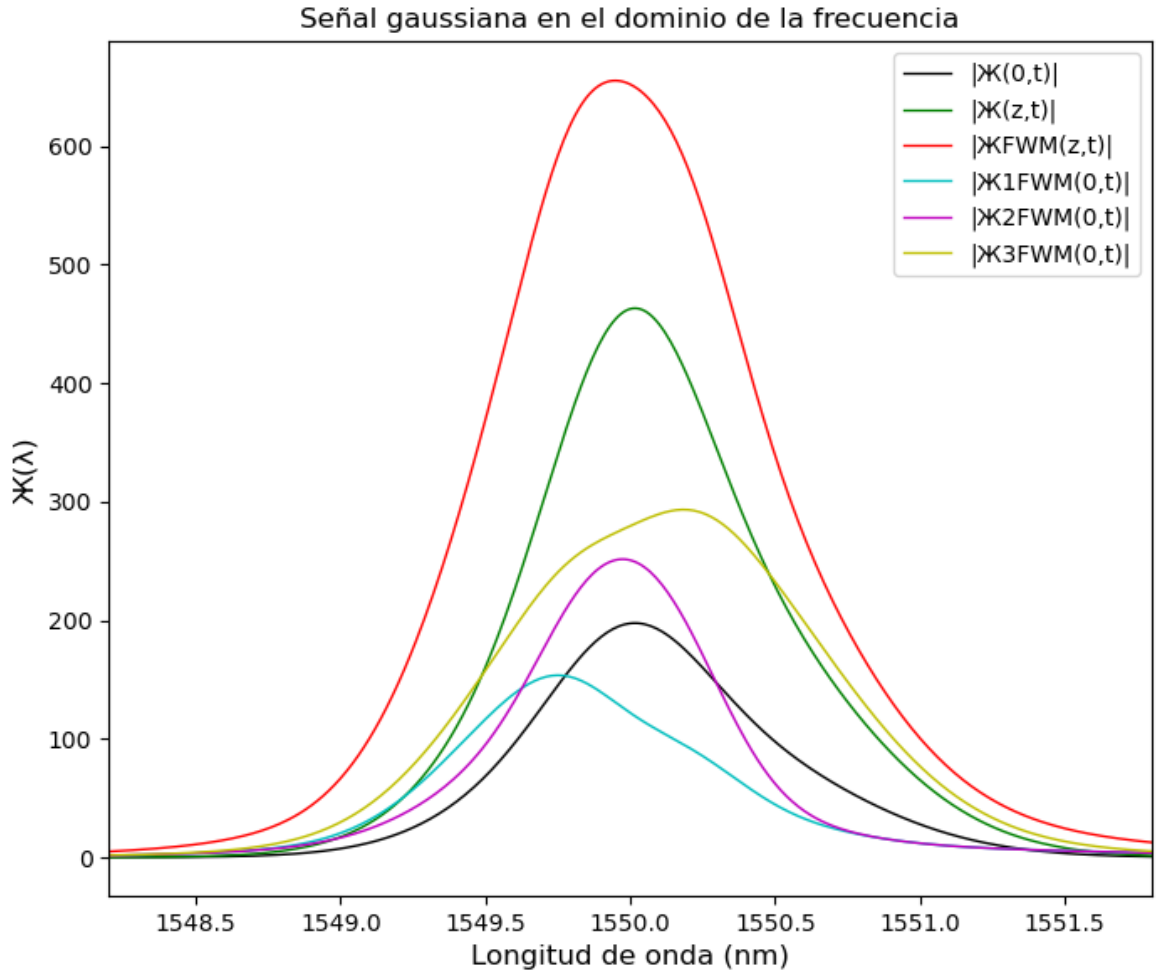


Fuente: elaboración propia.

La tabla 7 presenta los resultados de la simulación de un sistema de comunicaciones ópticas bajo los efectos de la FWM y otros fenómenos dispersivos y no lineales. Los parámetros de dispersión de segundo orden para tres longitudes de onda diferentes tienen valores similares que indican que la fibra es altamente dispersiva anómala en estas longitudes de onda, un comportamiento que puede aumentar la susceptibilidad a la FWM.

Asimismo, los parámetros de dispersión de tercer orden también varían ligeramente entre sí. Este fenómeno sugiere entonces una complejidad adicional en la variación de la dispersión con la longitud de onda, lo cual puede incrementar la distorsión temporal y espectral de las señales ópticas.

Figura 25. Gráfica del efecto FWM en la propagación de pulsos gaussianos en sistema WDM en MainOptik Simulator



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, los coeficientes de chirrido con valores negativos indican constantes de curvatura de la dispersión, que afectan la distribución espectral de la FWM y contribuyen a la interacción no lineal entre las señales. Los anchos temporales también están en la escala de nanosegundos y milisegundos, lo cual es relevante para la sincronización y el retardo temporal de las señales a través de la fibra. Además, la longitud efectiva representa la distancia a lo largo de la cual los efectos no lineales son significativos, mientras que el valor de la constante de no linealidad confirma una alta susceptibilidad a los efectos no lineales, como la FWM.

Tabla 7. Resultados de FWM para el escenario de comunicación

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
β_{21}	$-40,73501 \text{ ps}^2/\text{km}$	$C_{11}(z)$	$-90,52224$
β_{22}	$-40,77497 \text{ ps}^2/\text{km}$	$C_{12}(z)$	$-50,96872$
β_{23}	$-40,81496 \text{ ps}^2/\text{km}$	$C_{13}(z)$	$-204,07478$
β_{31}	$0,39874 \text{ ps}^3/\text{km}$	T_{11}	$2.567,41227 \text{ ps}$
β_{32}	$0,53224 \text{ ps}^3/\text{km}$	T_{12}	$611,30603 \text{ ps}$
β_{33}	$0,26642 \text{ ps}^3/\text{km}$	T_{13}	$19.614,42903 \text{ ps}$
L_{eff}	$12,81811 \text{ km}$	γ_{prom}	$1,39355 \text{ W}^{-1}/\text{km}$
$OSNR_{ijk}$	$36,42598 \text{ dB}$	$NFWM_{ijk}$	$1,94282 \text{ }\mu\text{W}$

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, respecto a la OSNR, el valor obtenido sugiere una buena calidad de la señal en términos de ruido óptico. Sin embargo, la potencia del ruido por FWM (NFWM) indica una presencia considerable de productos de mezcla no deseados, lo cual podría degradar la señal. En síntesis, aunque existe un buen manejo de ruido, los efectos dispersivos y no lineales, especialmente la FWM, requieren una gestión cuidadosa. La implementación de técnicas de compensación de dispersión y la optimización de la potencia de señal y la longitud de onda son cruciales para mitigar estos efectos y mantener una transmisión de alta calidad en el sistema de comunicaciones ópticas.

5.6. Ejercicios propuestos

1. Un sistema WDM de tres canales tiene una potencia de entrada de 20 mW para cada uno. La longitud de onda del canal 1 es de 1.549,8 nm; la del canal 2, de 1.550 nm; y la del canal 3, de 1.550,2 nm, con ancho temporal de entrada de 3 ps, 4 ps y 2 ps respectivamente. A través del método de multiplexación, estas señales se transmiten por un enlace de fibra óptica de 20

km con dos conectores con pérdida de 0,1 dB, utilizando 30 empalmes con pérdidas de 0,1 dB. El diámetro de campo modal es de 10 μm , el índice de no linealidad es de $2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, el índice de refracción lineal es 1,48 y el coeficiente de atenuación es de 0,21 dB/km. Este sistema a su vez posee una eficiencia espectral de 0,7, una eficiencia FWM de 0,9, y un factor de degeneración de 6, sin factor *chirp* generado por el transmisor. Calcular:

- a) GVD β_2 (en ps^2/km) para cada canal.
- b) TOD β_3 (en ps^3/km) para cada canal.
- c) *Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace para cada canal.
- d) Longitud efectiva del enlace (en km).
- e) Área efectiva del enlace (en μm^2).
- f) Ancho temporal de salida T_1 (en ps) para cada canal.
- g) Potencia de salida (en mW) para cada canal.
- h) Longitud de onda de cada armónico generado por el sistema.
- i) Potencia de cada armónico generado por el sistema.
- j) NFWM y OSNR para cada canal (en μW y dB respectivamente).

2. Un sistema WDM de tres canales tiene potencias de entrada de 18 mW para en canal 1, 22 mW para el canal 2 y 20 mW para el canal 3. La longitud de onda del canal 1 es de 1.549,5 nm; la del canal 2, de 1.550 nm; y la del canal 3, de 1.550,5 nm, con ancho temporal de entrada de 3 ps, 4 ps y 2 ps respectivamente. A través del método de multiplexación, estas señales se transmiten por un enlace de fibra óptica de 25 km con dos conectores con pérdida de 0,1 dB cada uno, utilizando 35 empalmes con pérdidas de 0,1 dB cada uno. El diámetro de campo modal es de 9,5 μm , el índice de no linealidad es de $2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, el índice de refracción lineal es 1,46 y el coeficiente de atenuación es de 0,2 dB/km. Este sistema a su vez posee una eficiencia espectral de 0,8, una eficiencia FWM de 0,85, y un factor de degeneración de 6, sin factor *chirp* generado por el transmisor. Calcular:

- a) GVD β_2 (en ps^2/km) para cada canal.
- b) TOD β_3 (en ps^3/km) para cada canal.
- c) *Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace para cada canal.
- d) Longitud efectiva del enlace (en km).
- e) Área efectiva del enlace (en μm^2).
- f) Ancho temporal de salida T_1 (en ps) para cada canal.
- g) Potencia de salida (en mW) para cada canal.
- h) Longitud de onda de cada armónico generado por el sistema.
- i) Potencia de cada armónico generado por el sistema.
- j) NFWM y OSNR para cada canal (en μW y dB respectivamente).

3. Un sistema WDM de tres canales tiene una potencia de entrada de 21 mW para cada uno. La longitud de onda del canal 1 es de 1.549,7 nm; la del canal 2, de 1.550 nm; y la del canal 3, de 1.550,3 nm, con ancho temporal de entrada de 3,5 ps, 4,5 ps y 2,5 ps respectivamente. A través del método de multiplexación, estas señales se transmiten por un enlace de fibra óptica de 22 km con dos conectores con pérdida de 0,15 dB cada uno, utilizando 32 empalmes con pérdidas de 0,12 dB cada uno. El diámetro de campo modal es de 10,2 μm , el índice de no linealidad es de $2,7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, el índice de refracción lineal es 1,47 y el coeficiente de atenuación es de 0,22 dB/km. Este sistema a su vez posee una eficiencia espectral de 0,75, una eficiencia FWM de 0,88, y un factor de degeneración de 5, sin factor *chirp* generado por el transmisor. Calcular:

- a) GVD β_2 (en ps^2/km) para cada canal.
- b) TOD β_3 (en ps^3/km) para cada canal.
- c) *Chirp* instantáneo C_1 en el extremo final del enlace para cada canal.
- d) Longitud efectiva del enlace (en km).
- e) Área efectiva del enlace (en μm^2).
- f) Ancho temporal de salida T_1 (en ps) para cada canal.
- g) Potencia de salida (en mW) para cada canal.
- h) Longitud de onda de cada armónico generado por el sistema.
- i) Potencia de cada armónico generado por el sistema.
- j) NFWM y OSNR para cada canal (en μW y dB respectivamente).

Referencias

- ABET. (2021). *Criteria for Accrediting Engineering Programs*. <https://www.abet.org/wp-content/uploads/2022/01/2022-23-EAC-Criteria.pdf>
- Achari, S., Yang, A. Y., Goodhead, J., Swanepoel, B. y Cheng, L. (2024). Self-synchronizing on-off-keying visible light communication system for intra- and inter-vehicle data transmission. *SAIEE Africa Research Journal*, 115(1), 4-15. <https://doi.org/10.23919/SAIEE.2024.10463748>
- Agrawal, G. P. (2013). Group-Velocity Dispersion. En G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics: A volume in Optics and Photonics* (5.^a ed., pp. 57-85). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-00045-5>
- Alifdal, H., Abdi, F. y Abbou, F. M. (2017). Performance analysis of an 80Gb/s WDM system using OQPSK modulation under FWM effect and chromatic dispersion. En *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/WITS.2017.7934663>
- Blaunstein, N., Engelberg, S., Krouk, E. y Sergeev, M. (2020). *Fiber Optic and Atmospheric Optical Communication* (1.^a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Couch, L. W. (2007). Señalización pasabanda modulada binaria. En L. W. Couch, *Sistemas de comunicación digitales y analógicos* (7.a ed., pp. 339-352). Pearson Educación.
- De Prado, R. P., García-Cárdenas, M., García-Galán, S. y Muñoz-Expósito, J. E. (2019). Interactive tool for learning propagation in single-mode optical fibers in telecommunication engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 27(4), 789-813. <https://doi.org/10.1002/cae.12117>
- Ghatak, A. y Thyagarajan, K. (2000). Optical Waveguides and Fibers. En *Fundamentals of Photonics* (2.^a ed., pp. 269-292). University of Connecticut.

- Gómez, F., Puerto, K. C. y Guevara, D. (2015a). Effect nonlinear four-wave mixing in optical fiber transmission. En *2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2015.7428471>
- Gómez, F., Puerto, K. C. y Guevara, D. (2015b). La fibra óptica y el fenómeno no lineal mezcla de cuarta onda. *Mundo FESC*, 5(9), 43-59. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/58>
- ITU-T. (2015). Recomendación UIT-R V.431-8: Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones. <https://www.itu.int/dms/pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-S.pdf>
- ITU-T. (2016). Recommendation G.652: Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cable. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/>
- Keiser, G. (2010). *Optical Fiber Communications* (4.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Ley 1341 de 2009 (2009, 30 de julio). Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones TIC, se crea la Agencia Nacional de Espectro y se dictan otras disposiciones. El Congreso de Colombia. Diario Oficial núm. 47.426. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=36913>
- Pedrotti, L. S. (2008). Basic Geometrical Optics. En C. Roychoudhuri (Ed.), *Fundamentals of Photonics* (1.ª ed., pp. 73-115). SPIE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1117/3.784938>
- Serway, R. A. y Jewett, J. W. (2008). Ondas electromagnéticas. En *Física para ciencias e ingeniería con Física moderna* (Vol. 2, 7.ª ed., pp. 952-976). Cengage Learning.
- Serway, R. A. y Jewett Jr., J. W. (2014). Aproximación de un rayo en óptica geométrica. En *Física para ciencias e ingeniería* (Vol. 2, 9.ª ed., pp. 1061-1062). Cengage Learning.
- Singh, S., Singh, S., Ngo, Q. M. y Mohammadi, A. M. (2020). Analysis of all-optical wavelength converter based on FWM effect in HNLF for coherent 100 Gbps dual-polarized DQPSK signal. *Optical Fiber Technology*, 59, 102323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102323>