



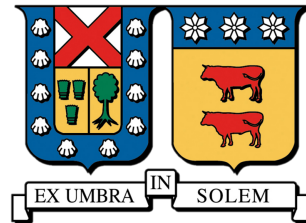
UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



DEPARTAMENTO DE
ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
Valparaíso - Chile



Simulación de un sensor acústico distribuido en fibra óptica basado en reflectometría óptica en el dominio temporal

Marcos Antonio Rojas Mardones

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRÓNICO CON MENCIÓN EN TELECOMUNICACIONES

Profesor guía: Marcelo A. Soto Hernández
Profesor coreferente: Ricardo Olivares Véliz

Marzo - 2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de alguna manera en este trabajo.

Primero a mi profesor guía Marcelo A. Soto hernández por el apoyo, las direcciones y correcciones, las cuales representaron un apoyo fundamental.

He de agradecer a los proyectos FONDECYT Regular 1200299, ANID y Basal FB008, ANID.

Además quisiera agradecer a todas las personas que me han dado su apoyo y confianza en los últimos seis años de estudio y sobretodo en la elaboración de este documento.

Yerko Ayala, Mathias Riquelme, Roberto Monsalve, Kevin Gajardo, Juan Pablo, Vicente Perez, a mi madre Inés Mardones García, mi padre Bartolomé Antonio Rojas, Alejandro Peralta e Iván Choque.

Quisiera por último dedicar agradecimientos especiales a Iván Torres por la ayuda prestada en esta memoria.



Simulación de un sensor acústico distribuido en fibra óptica basado en reflectometría óptica en el dominio temporal

Marcos Rojas Mardones

Memoria para Optar al Título de Ingeniero civil Electrónico, Mención en Telecomunicaciones.

profesor guía: Marcelo A. Soto Hernandez

Marzo 2024

Resumen

La sensorización de vibraciones y temperatura, también conocida como sensorización acústica y térmica respectivamente, es relevante en la sociedad e industria actual. Existen diversas aplicaciones en las cuales el monitoreo y los datos obtenidos a través de estos son de suma importancia, como en la industria petrolera, en la fabricación y mantenimiento de puentes, en la industria aeronáutica, por nombrar algunos. La utilización de fibra óptica para la sensorización se vuelve interesante, ya que permite la instalación de sensores distribuidos espacialmente, también conocidos como DAS o DTS. Estos sensores aprovechan un fenómeno físico llamado dispersión de Rayleigh, el cual hace que la luz propagada por una fibra óptica se refleje de vuelta a su punto de emisión. El análisis de esta luz reflejada y la obtención de las trazas resultantes permiten comprender y obtener información respecto a perturbaciones mecánicas y térmicas en la fibra óptica. A este esquema de obtención de datos se le llama reflectometría óptica en el dominio temporal (OTDR por sus siglas en inglés). Por lo tanto, la comprensión de este fenómeno físico y su influencia en la adquisición de datos de vibración y temperatura es de alta relevancia para perfeccionar las técnicas de DAS y DTS.

En este proyecto se diseña e implementa en MATLAB un simulador de fibra óptica, este se utiliza para generar los efectos de la dispersión de Rayleigh e implementar dispositivos DAS, DVS (un caso particular de DAS) y DTS. Todo esto se realiza basándose en investigaciones e implementaciones de sistemas realizadas en los últimos años en todo el mundo, como los trabajos de Pedro Tovar [55], Juan Pastor [51], Arthur H. Hartog [47], entre otros.

El simulador se basa en el principio de modularidad, separando diferentes sistemas o módulos que reproducen distintas partes del proceso de simulación de todo el sistema. Éstos se comunican entre sí y se implementan como clases. El simulador requiere que se ingresen datos fundamentales de la fibra óptica y el emisor y puede generar diferentes resultados, desde información sobre la propagación de un pulso de luz en la fibra óptica, hasta la obtención de todos los datos relacionados con los DAS, DVS y DTS. Además, el simulador implementado cuenta con una serie de funcionalidades y capacidades que permiten su uso de varias maneras y su mejora mediante la modificación o adición de nuevos sistemas o módulos.

Para corroborar la efectividad del simulador se introducen perturbaciones mecánicas y térmicas en la fibra óptica y estas perturbaciones se recuperan mediante los DAS, DVS y DTS. Los resultados obtenidos muestran una recuperación casi completa de las perturbaciones originales, tanto de manera estática como dinámica.

En conclusión, se obtiene un simulador capaz de simular una fibra óptica, la propagación de la luz en la misma, la generación de la luz producida por la dispersión de Rayleigh, su utilización en sistemas llamados Phase Sensitive OTDR y finalmente su uso en sistemas DAS y DTS. El sistema implementado también cuenta con capacidades para probar el funcionamiento de diferentes algoritmos de procesamiento de datos, probar nuevas metodologías de sensorización y probar diferentes modelos estadísticos que describen el comportamiento de la dispersión de Rayleigh.



Simulation of a distributed acoustic Sensor in optic fiber based in optic time domain reflectometry

Marcos Rojas Mardones

Final Project Report towards the fulfillment of the Ingeniero civil Electrónico, Minor in Telecommunications degree (6 years program).

Advisor: Marcelo A. Soto Hernandez

March 2024

Abstract

Vibration and temperature sensing, also known as acoustic and thermal sensing respectively, are relevant in today's society and industry. There are various applications where monitoring and data obtained through these sensors are of utmost importance, such as in the oil industry, in the manufacturing and maintenance of bridges, in the aerospace industry, to name a few. The use of optical fiber for sensing becomes interesting as it allows for the installation of spatially distributed sensors, also known as DAS or DTS. These sensors leverage a physical phenomenon called Rayleigh scattering, which causes light propagated through an optical fiber to reflect back to its point of emission. Analyzing this reflected light and obtaining the resulting traces allows understanding and obtaining information regarding mechanical and thermal disturbances in the optical fiber. This data acquisition scheme is referred to as Optical Time Domain Reflectometry (OTDR). Therefore, understanding this physical phenomenon and its influence on vibration and temperature data acquisition is highly relevant for refining DAS and DTS techniques.

In this project, a simulator of optical fiber is designed and implemented in MATLAB. This simulator is used to generate the effects of Rayleigh scattering and implement DAS, DVS (a particular case of DAS), and DTS devices. All of this is done based on research and system implementations conducted in recent years worldwide, such as the works of Pedro Tovar [55], Juan Pastor [51], Arthur H. Hartog [47], among others.

The simulator is based on the principle of modularity, separating different systems or modules that reproduce different parts of the simulation process of the entire system. These communicate with each other and are implemented as classes. The simulator requires fundamental data input of the optical fiber and the emitter and can generate different results, from information on the propagation of a light pulse in the optical fiber to obtaining all data related to DAS, DVS, and DTS. Additionally, the implemented simulator has a series of functionalities and capabilities that allow its use in various ways and its improvement through the modification or addition of new systems or modules.

To corroborate the effectiveness of the simulator, mechanical and thermal disturbances are introduced into the optical fiber, and these disturbances are recovered using DAS, DVS, and DTS. The results obtained show almost complete recovery of the original disturbances, both statically and dynamically.

In conclusion, a simulator capable of simulating an optical fiber, the propagation of light within it, the generation of light produced by Rayleigh scattering, its use in systems called Phase Sensitive OTDR, and finally its use in DAS and DTS systems is obtained. The implemented system also has capabilities to test the operation of different data processing algorithms, test new sensing methodologies, and test different statistical models that describe the behavior of Rayleigh scattering.

Índice

1	Introducción	9
2	Estado del arte	11
2.1	Generalidades sobre sistemas de fibra óptica	11
2.1.1	Reflexión interna total	12
2.1.2	Caracterización de un haz de luz en una fibra óptica	13
2.1.3	Modos de propagación y parametrización	15
2.2	Dispersión de Rayleigh	17
2.3	Dispersión de Rayleigh en fibra óptica	18
2.4	Reflectometría óptica en dominio temporal (OTDR)	20
2.5	Phase Sensitive OTDR	25
2.5.1	Principio de funcionamiento	26
2.5.2	Variación de fase	28
2.6	Adquisición e interpretación de trazas Phase Sensitive OTDR	29
2.6.1	Detección basada en análisis de amplitud	29
2.6.2	Detección basada en análisis de fase	30
2.7	Resumen	33
3	Diseño e implementación del simulador	35
3.1	Objetivos y función del simulador	35
3.2	Descripción general del simulador	35
3.3	Descripción de componentes	37
3.3.1	Módulo fibra	37
3.3.2	Módulo emisor	38
3.3.3	Módulo propagador	39
3.3.4	Módulo Rayleigh	42
3.3.5	Módulo perturbador	46
3.3.6	Módulo demodulador de fase	48
3.4	Validaciones de los modelos	53
3.4.1	Propagación de un pulso por la fibra	54
3.4.2	Efectos de las perturbación sobre la propagación del pulso	55
3.4.3	Generación de reflectores	58
3.4.4	Generación de trazas Phase Sensitive OTDR	60
3.4.5	Funcionamiento del sistema DAS y DTS	63
3.4.6	Análisis final	67
3.5	Limitaciones del simulador	68
3.5.1	Largo de los segmentos de fibra óptica	68
3.5.2	Fallas en el desenvolvimiento de fase	68
3.5.3	Limitación en el emisor	70
4	Simulaciones realizadas	71
4.1	Efecto del ruido sobre la medición	72
4.2	Efecto del ruido en mediciones a distintas distancias	73
4.3	Detección de perturbación estática por intensidad	74
4.4	Detección de perturbación dinámica por intensidad	76
4.5	Reconstrucción temporal de cambio térmico por análisis de fase diferencial	77
4.6	Reconstrucción temporal de variación tensorial de tono puro por análisis de fase diferencial	79
4.7	Reconstrucción temporal de variación tensorial por análisis de fase diferencial	81
5	Conclusiones	83
6	Bibliografía	85

Índice de figuras

1	Espectros de dos emisores típicos. (a) Espectro de un láser [58]. (b) Espectro de un LED [59]	11
2	Transmisión y reflexión de un rayo de luz, las flechas rojas representan los rayos de luz.	12
3	Estructura típica de una fibra monomodo [39]	13
4	Cono de aceptación en una fibra óptica [13]	13
5	Distribución del índice de refracción de una fibra escalonada [13]	14
6	Funciones de Bessel de primer tipo [40]	15
7	Gráfico de $b(V)$ para distintos modos de propagación, se calcula asumiendo una gran diferencia entre los valores de n_1 y n_2 [13]	16
8	Patrón de radiación dipolar, en el eje vertical se encuentra el eje de vibración, la distancia entre el centro de la figura y los puntos de la superficie representan la potencia a la que irradia	17
9	Nivel de dispersión en función de la longitud de onda [34]	18
10	Perfil de pérdidas en función de la longitud de onda [13]	19
11	Dispersión de Rayleigh en fibra óptica, el círculo representa un centro de scattering, en rojo se puede observar la luz dispersada fuera del cono de aceptación, mientras que en azul se puede ver la luz dispersada dentro del cono de aceptación,	19
12	Sistema OTDR típico, light source representa el emisor, Pulse representa el pulso enviado, Fiber Under Test representa la fibra óptica que se encuentra bajo prueba, Backscattered signal representa la onda de backscattering, el photodetector representa el fotodetector, data acquisition representa el sistema electrónico que recibe los datos desde el fotodetector, el círculo con la flecha representa el circulador. [51]	20
13	Esquema para la explicación del principio de funcionamiento de un sistema OTDR	21
14	Diagrama del principio de funcionamiento de un sistema OTDR hasta que el pulso es emitido por completo a la fibra. (a) Primer instante. (b) Segundo instante. (c) Tercer instante. (d) Cuarto instante. (e) Quinto instante. (f) Sexto instante.	23
15	Diagrama del principio de funcionamiento de un sistema OTDR primeros instantes del pulso recién emitido. (a) Primer instante. (b) Segundo instante. (c) Tercer instante.	24
16	Traza OTDR Común [41]	25
17	Propagación de backscattering en fibra óptica, las esferas azules representan centros de scattering [51]	26
18	Traza típica de una medición con técnica Φ OTDR [42]	28
19	Sensor DVS mediante modificación de amplitud directa	29
20	Configuración típica de sensado por interferencia [47]	32
21	Esquema de funcionamiento de un sistema heterodino	32
22	Traza de sensado heterodino [47]	33
23	Configuración clásica de sensado homodino [47]	33
24	Diagrama de funcionamiento del simulador	36
25	Segmentación de la fibra óptica en la simulación	37
26	Perfil de longitud de onda real comparado con el perfil discretizado	39
27	Aproximación para el cálculo de V , en rojo se puede ver la curva aproximada y en la recta azul se puede ver el límite de $V = 2,405$	40
28	Fibra óptica utilizada para la explicación del algoritmo de generación de la traza de backscattering	43
29	Primer paso del algoritmo para la generación del campo eléctrico	43
30	Segundo paso del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico	44
31	Tercer paso del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico	44
32	Condición de continuidad del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico de backscattering	44
33	Condición de término del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico de backscattering	44
34	Diagrama de la generación de la traza, en amarillo se observa los segmentos que producen la onda de backscattering, en verde se puede ver la onda de backscattering recién generadas, las flechas rojas representan el movimiento de la onda de backscattering y en naranja se observan las ondas de backscattering propagadas	45
35	Diagrama del diseño del sistema de adquisición de datos del simulador, E representa el campo eléctrico incidente, I representa la información de la intensidad del campo eléctrico y F representa la información relevante sobre la fase del campo eléctrico, obtenida por medio de un sistema de procesamiento de datos.	48
36	Fases de las trazas	49
37	Fases de las trazas desentrelazadas	50
38	Fases diferenciales	50
39	Curva de diferencia de fases diferenciales	51
40	Resta de fases diferenciales escalada	52
41	Promedio móvil de la figura anterior	52

42	Propagación de un campo eléctrico simulado, arriba se observa la magnitud del campo eléctrico, abajo se observa la fase del campo eléctrico	55
43	Variación de propagación con perturbación térmica. (a) Variación de amplitud para la perturbación térmica. (b) Variación de fase para la variación térmica. (c) Zoom a la primera pendiente en la variación de fase, asociado a una variación térmica 50 K. (d) Zoom a la segunda pendiente en la variación de fase, asociado a una variación térmica -20 K	56
44	Variación de propagación con perturbación tensorial. (a) Variación de amplitud para la variación tensorial. (b) Variación de fase asociado a la variación tensorial. (c) Zoom a la primera pendiente asociado a una variación tensorial de $0.5 \mu\epsilon$. (d) Zoom a la segunda pendiente en la variación de fase asociado a una variación tensorial de $0.9 \mu\epsilon$	57
45	Variación de propagación con perturbación térmica y tensorial. (a) Variación de amplitud de la variación térmica y tensorial. (b) Variación de fase de la variación térmica y tensorial. (c) Zoom a las pendientes de la fase de la propagación con perturbación térmica y tensorial	58
46	Histogramas de amplitudes de reflectores con distinto tamaño de segmento. (a) Histograma de amplitud con segmentos de tamaño 1 mm. (b) Histograma con segmentos de tamaño 1 cm. (c) Histograma de amplitud con segmentos de tamaño 1 m. (d) Histograma de amplitud con segmentos de tamaño 10 m.	59
47	Histograma de fases de reflectores con distinto tamaño de segmento. (a) Histograma de fase con segmentos de tamaño 1 mm. (b) Histograma de fase con segmentos de tamaño 1 cm. (c) Histograma de fase con segmentos de tamaño 1 m. (d) Histograma de fase con segmentos de tamaño 10 m.	59
48	Traza Phase Sensitive OTDR simulada. (a) Magnitud de la traza. (b) Fase de la traza. (c) Fase de la traza desenvuelta	61
49	Histograma de las trazas Phase Sensitive OTDR. (a) Histograma de magnitud de la traza. (b) Histograma de fase de la traza	62
50	Intensidad con un muestreo de 2.0263 MHz	62
51	Histograma de magnitud del campo eléctrico para una propagación sin pérdidas	62
52	Fases desenvueltas de trazas Phase sensitive OTDR con perturbaciones. (a) Trazas desenvueltas completa. (b) Trazas desenvueltas en la perturbación térmica. (c) Trazas desenvueltas en la perturbación tensorial.	64
53	Resta de trazas desenvueltas con perturbaciones. (a) Resta de trazas desenvueltas. (b) Resta de trazas desenvueltas en la perturbación térmica. (c) Resta de trazas desenvueltas en la perturbación tensorial.	65
54	Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR sin filtrar. (a) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR. (b) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación térmica. (c) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación tensorial.	65
55	Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR filtrado. (a) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR. (b) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación térmica. (c) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación tensorial.	66
56	Análisis de la simetría de las variaciones en las trazas Phase Sensitive OTDR.	67
57	Recuperación de variaciones de temperatura y tensión a partir de trazas Phase Sensitive OTDR. (a) Recuperación de la variación de temperatura a partir de una traza Phase Sensitive OTDR. (b) Recuperación de la variación de tensión a partir de una traza Phase Sensitive OTDR.	67
58	Falla del desenvolvimiento de fase en la recuperación de $\Delta \bar{n}$. (a) Falla en el desenvolvimiento de fase (b) Falla en la recuperación de variación de índice de refracción con variación de 10^{-10}	69
59	Diferentes recuperaciones de $\Delta \bar{n}$ con fallas en el desenvolvimiento. (a) Variación de 10^{-9} . (b) Variación de 10^{-8} . (c) Variación de 10^{-7}	70
60	Efecto del ruido sobre la recuperación de temperatura. (a) Medición sin ruido de la temperatura a una distancia de 350 metros. (b) Medición con ruido de la temperatura a una distancia de 350 metros.	72
61	Variación del SNR con la distancia. (a) Medición en la primera perturbación a una distancia de 100 metros. (b) Medición en la segunda perturbación a una distancia de 10Km. (c) Medición en la tercera perturbación a una distancia de 60Km. (d) Medición en la cuarta perturbación a una distancia de 80Km	74
62	Traza DVS simulado en base a detección por intensidad	75
63	Detección dinámica de perturbación por análisis de intensidad. (a) FFT de la fibra completa, es posible observar los 3 puntos de perturbación. (b) Zoom a la perturbación de 2 KHz. (c) Zoom a la perturbación de 16 KHz. (d) Zoom a la perturbación de 20 KHz.	77
64	Reconstrucción temporal de una perturbación térmica por medio de análisis de variación de fase.	79
65	Reconstrucción de una variación de tensión de 500 Hz	80

66	FFT de la recuperación de una variación de tensión sinusoidal pura. (a) FFT de la fibra completa, es posible observar la perturbación tensorial en entre los 500 y 650 metros. (b) Zoom a la perturbación tensorial de 500 Hz.	80
67	FFT de la perturbación triangular en la simulación dinámica.	81
68	Reconstrucción de una perturbación dinámica de tensión equivalente a un tren de funciones triangulares	82
69	FFT de la fibra con una perturbación de tensión consistente en un tren de triangulares.	82

Índice de cuadros

1	Comparativa entre r y R	42
2	Variaciones en la propagación producidas por perturbaciones ambientales sobre la fibra óptica	63

1. Introducción

La comunicación en la humanidad siempre ha sido de importancia radical y es en gran medida, lo que ha permitido el progreso de la misma al ritmo, velocidad y coordinación con los cuales ha llegado hasta la actual era moderna. En ese mismo sentido, las telecomunicaciones han tenido una historia larga y compleja. Los primeros antecedentes de telecomunicaciones se encuentran esparcidos en muchas partes del planeta; por ejemplo, los chinos hacían uso de señales de humo para comunicarse en la Gran Muralla China, a través de éstas, era posible transmitir información sobre ataques enemigos a más de 7300 kilómetros [1][2].

Con el paso de los años, las telecomunicaciones y la electrónica evolucionaron. En el año 1833, se inventó el primer telégrafo por parte de Gauss y Webber [3], un sistema capaz de enviar información a través de mensajes de texto codificados en morse (normalmente) mediante la transmisión o no transmisión de corriente eléctrica [4]. Con este dispositivo, se inició la era de las telecomunicaciones electrónicas alámbricas. Posteriormente, a partir de esta tecnología, se crearía el primer teléfono en el año 1876 por Alexander Graham Bell[5], el cual requería una conexión alámbricas entre los dos dispositivos comunicantes. A principios del siglo XX, gracias a los trabajos de Maxwell junto con otros investigadores, se logró entender de mejor manera las ondas electromagnéticas, lo que permitió la construcción por primera vez de sistemas de telecomunicaciones inalámbricas que se utilizan hasta el día de hoy [6].

Dentro de las tecnologías de telecomunicaciones actuales, la fibra óptica sigue siendo una de las mejores formas de transmitir información a largas distancias. Se trata de una delgada fibra de vidrio transparente que transporta luz. Gracias al uso de la luz y a su naturaleza, esta tecnología ofrece una manera eficiente y extremadamente rápida de transmitir información, con muy pocas pérdidas de señal.

Las pocas pérdidas que presenta se deben principalmente a dos fenómenos: la absorción y la dispersión, siendo esta última el fenómeno por el cual la luz se desvía en distintas direcciones. Dentro de las diferentes formas de dispersión existentes, la que contribuye en mayor medida a este fenómeno es la dispersión de Rayleigh. De esta forma, aunque la comunicación a través de fibra óptica permite alcanzar distancias muy grandes, aún se encuentra limitada por las pérdidas de señal, y por lo tanto, en parte, por la dispersión de Rayleigh. [7][8].

Sin embargo, la dispersión de Rayleigh tiene varias implicaciones, ya que ésta genera de manera residual una señal óptica que resulta sumamente útil para adquirir información de la fibra y su entorno. Gracias a esto se generaron las primeras tecnologías de reflectometría óptica en el dominio temporal (OTDR por sus siglas en inglés), las cuales permiten evaluar el estado de una fibra óptica en tiempo real, identificando puntos de falla de manera eficiente, sin necesidad de que haya operarios inspeccionando la fibra. El uso de esta técnica tuvo una segunda revolución cerca de los años 90, momento en el cual, gracias al trabajo de diversos investigadores y a las recientes capacidades de utilizar emisores de alta tecnología, se descubrieron las particulares propiedades que poseía la dispersión de Rayleigh en la presencia de estos emisores, dando génesis a la tecnología phase sensitive OTDR (también escrito como Φ OTDR), la cual tiene la capacidad de adquirir información sobre perturbaciones de temperatura, compresión y elongación (strain) en la fibra óptica [9].

La aparición de esta nueva técnica permitió utilizar la fibra óptica para otros fines diferentes a la comunicación, siendo ahora útiles en el área de la sensorización de perturbaciones térmicas y mecánicas (o también llamadas acústicas).

La técnica Phase Sensitive OTDR posee una serie de ventajas sobre sensores clásicos. La fibra óptica es altamente flexible, portátil y de fácil instalación a diferencia de los sistemas clásicos que presentan mayores dificultades técnicas para su utilización.

Gracias a estas ventajas es que es apto para ambientes con altas dificultades espaciales y topografías complejas. Por otro lado, gracias a que la información nace de la interacción entre un pulso emitido y la fibra, el uso energético se encuentra completamente condensado en puntos concretos, permitiendo que su uso sea adecuado para lugares que tengan dificultades en el uso eléctrico[10].

Algunos de los casos de uso que pueden tener los sensores basados en tecnologías Phase Sensitive OTDR incluyen la sensorización de puentes, vías ferroviarias, minería, industria petrolera, entre otros [11][12]. Las grandes ventajas anteriormente mencionadas que ofrecen los sistemas phase sensitive OTDR sobre los otros sistemas de sensorización han llevado a invertir una gran cantidad de energía y dinero en su desarrollo, sin embargo, debido a la naturaleza que tiene el fenómeno físico de la dispersión de Rayleigh, las fibras ópticas, los emisores y todos los sistemas relacionados a estos, es que se tiene como consecuencia que la investigación de los sistemas previamente mencionados sea compleja, larga y costosa. Junto con todo lo anterior, una parte importante del funcionamiento del sistema se encuentra ligado a condiciones estocásticas que rodean a las fibras y su fabricación, lo que encarece las pruebas e iteraciones de técnicas sobre distintas condiciones de funcionamiento.

Es entonces cuando se hace evidente la necesidad de una forma más sencilla, barata, práctica y portátil para poder trabajar e iterar sobre esta técnica. Ante esta disyuntiva, se presenta en este trabajo una posible solución: la utilización de un sistema de software capaz de simular todos los fenómenos físicos que rodean al sistema y su utilización en la técnica phase sensitive OTDR.

Las perturbaciones que se suelen medir con la técnica phase sensitive OTDR incluye principalmente dos, variaciones de temperatura y variaciones de tensión (o strain), pudiendo hacer una sensorización distribuida en toda la fibra, lo

que le otorga sus nombres, DAS (distributed acoustic¹ sensor) y DTS (distributed temperature sensor). Además en este trabajo se incluye la simulación de un DAS particular referido como DVS (distributed vibration sensor), el cual es capaz de adquirir parte de la información de un DAS.

De esta forma, el objetivo principal de la memoria es la implementación de un simulador de sensor acústico y térmico distribuido en fibra óptica, es decir, un DAS y DTS. Dicho sensor debe poseer las capacidades necesarias para recuperar tanto la magnitud de las perturbaciones, como las posiciones de éstas. Para lograr estos objetivos se cumplen los siguientes objetivos secundarios:

1. Simulación de propagación de luz en una fibra óptica: esta debe seguir las leyes conocidas y que se estudian en los siguientes capítulos.
2. Simulación de dispersión de Rayleigh: ésta debe de seguir modelos estocásticos realistas y respaldados por estudios previamente realizados por otros investigadores. La influencia de la dispersión debe de evidenciarse en los resultados.
3. Simulación de sistema Phase Sensitive OTDR: se obtiene un sistema capaz de reproducir la técnica phase sensitive OTDR, siendo capaz de observar la influencia de perturbaciones térmicas y mecánicas sobre la fibra óptica.
4. Simulación de DAS y DTS: finalmente se obtiene un sistema que es capaz de simular el funcionamiento de un sistema DAS y DTS. Siendo capaz de recuperar la magnitud y posición de perturbaciones mecánicas y térmicas.

El documento se organiza en 4 capítulos que presentan la información de manera ordenada y condensada.

- **Introducción:** El presente capítulo. Éste tiene por objetivo informar al lector sobre el origen de la problemática y dar a conocer las motivaciones para la creación del simulador.
- **Estado del arte:** En este capítulo se describe toda la teoría física y tecnológica que permite el funcionamiento de la técnica Phase Sensitive OTDR para su utilización en sensores acústicos distribuidos. El capítulo cuenta con una revisión completa y breve de conceptos básicos de sistemas de comunicación por fibra óptica, dispersión de Rayleigh, sistemas OTDR y finalmente sistemas Phase Sensitive OTDR. Al final del capítulo, se tendrá todo el conocimiento necesario para poder entender por completo el funcionamiento del simulador.
- **Diseño e implementación del simulador:** Este capítulo se compone de todas las explicaciones de los componentes que hacen que el simulador funcione. Explicaciones detalladas guiarán al lector por los algoritmos utilizados y aproximaciones realizadas. Seguido de esto, se presentan una serie de pruebas que tendrán por objetivo validar el funcionamiento de todos los componentes del simulador, asegurando que siga un comportamiento como el esperado por la teoría en un sistema físico que posea las mismas características. Por último, el capítulo se compondrá de una sección dedicada a describir las limitaciones del sensor y de la selección de parámetros específicos para asegurar un correcto funcionamiento del mismo.
- **Simulaciones realizadas:** Este capítulo tiene por objetivo hacer una recopilación de pruebas y simulaciones reales del simulador, mostrando de manera efectiva sus capacidades y resultados de interés.
- **Conclusión:** El último capítulo de esta memoria tiene por objetivo presentar todas las conclusiones de la experiencia del desarrollo del simulador construido.

¹Es común referirse a las vibraciones mecánicas como acústicas, es por este motivo que a los sensores de vibraciones y de tensión se les llama acústicos.

2. Estado del arte

Antes de describir el diseño y funcionamiento del simulador es necesario estudiar el fundamento físico en el cual se basa el fenómeno de dispersión de Rayleigh y de qué manera éste es utilizado para obtener información relevante desde una fibra óptica. Para este fin se realiza un breve repaso por toda la teoría que da origen a los sensores construidos sobre tecnología phase sensitive OTDR.

2.1. Generalidades sobre sistemas de fibra óptica

A pesar de que las comunicaciones ópticas han sido una parte importante de la historia moderna de la humanidad, el entendimiento pleno del fenómeno y la aplicación pragmática de la transmisión de luz solo se afianzo con la adquisición de conocimientos en física moderna en el siglo XIX. La incursión global de la fibra óptica en el ámbito industrial, como tecnología propulsora de las telecomunicaciones, marcó su inicio de manera destacada durante la década de los años 80 [20].

Es indispensable subrayar la distinción sustancial entre las tradicionales infraestructuras de cables, que transmiten señales mediante ondas de voltaje en un medio conductor como el cobre, y la fibra óptica, que desempeña su función de transporte de información mediante un haz de luz, también referido como onda óptica o rayo óptico (términos que pueden emplearse de manera intercambiable), a lo largo de un medio vítreo.

La estructura típica de los sistemas ópticos estudiados en esta memoria se basan básicamente en 3 componentes:

- **Emisor:** Este componente es el sistema encargado de emitir la luz. En algunas ocasiones se utilizan LEDs; sin embargo, esto tiene un inconveniente debido a que no proporcionan luz suficientemente pura, como se puede observar en la figura 1b. Este problema y sus implicaciones en el diseño se abordan en detalle en la sección 2.1.2. En contraste los láseres, emiten longitudes de onda mucho más puras, como las observada en la figura 1a. Los emisores suelen funcionar bajo una serie de principios físicos muy específicos, sin embargo para los sistemas ópticos relevantes para esta memoria son de mayor interés las siguientes características[28]:
 - **Frecuencia central:** Hace referencia a la frecuencia óptica más predominante en el emisor, y se suele medir en THz, aunque es habitual relacionarlos a su longitud de onda en nm.
 - **Ancho espectral:** Indica el rango de frecuencias (o longitudes de onda) presentes en el láser y de que manera se encuentran distribuidos.
 - **Otros peaks:** Es posible que emisores reales, además de contener su frecuencia central, posean potencia en otras frecuencias parásitas.

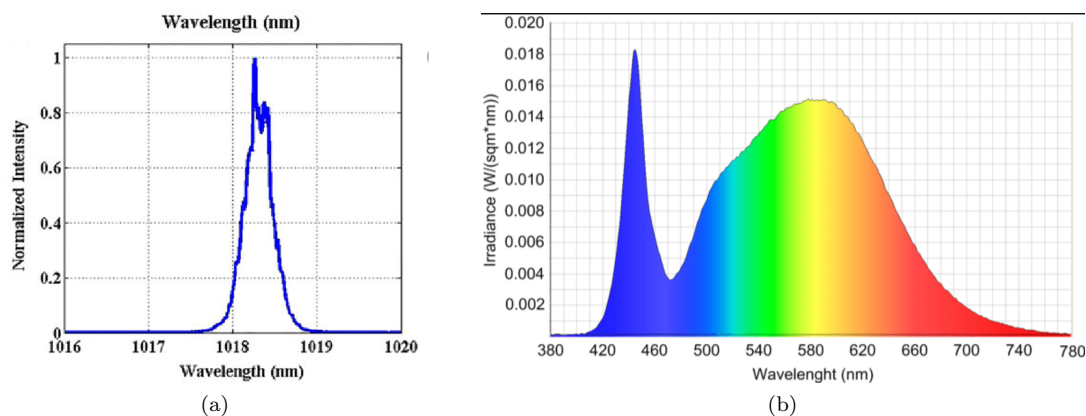


Figura 1: Espectros de dos emisores típicos. (a) Espectro de un láser [58]. (b) Espectro de un LED [59]

En la figura 1, se puede observar cómo esos parámetros están presentes. Además, es posible observar cómo los láseres tienen un ancho espectral mucho menor al de un LED.

- **Fibra óptica:** La fibra óptica es el medio físico por el cual la luz se propaga, como indica su nombre es un tubo extremadamente delgado y flexible, llegando a tener un diámetro cercano a los de 8.3 y de varios kilómetros de longitud μm [23]. En un extremo de la fibra se conecta un emisor óptico, el cual envía un pulso en forma de luz al otro extremo, en el cual se conecta el receptor óptico, permitiendo así la transmisión de señales a largas distancias. Para fines de esta memoria es importante comprender que el proceso de fabricación de la fibra óptica consta de la elaboración de un tubo de vidrio de sílice con un diámetro aproximadamente de 10 a 25

mm. Posteriormente, este tubo pasa por un proceso de adelgazamiento, lo cual disminuye su diámetro a las dimensiones requeridas. Al finalizar el proceso, se tienen que realizar pruebas exhaustivas para asegurar que la fibra óptica posea las propiedades necesarias para su uso e implementación[31].

- **Receptor:** Este componente es el encargado de captar la luz de la fibra óptica y de convertirla a señales eléctricas. Esto ultimo lo logra gracias a un sensor denominado fotodiodo, el cual esta construido a base de semiconductores, lo que le permite operar mediante la generación de una fotocorriente al detectar la intensidad de la onda óptica. Haciendo uso del fotodiodo y otros componentes electrónicos se construye el fotodetector el cual permite transformar la luz en señales eléctricas que pueden ser posteriormente procesadas y analizadas [29].

Es importante entender cómo la luz es capaz de transportarse por la fibra óptica, para este fin en las siguientes secciones se describen de manera general los principios físicos que permiten la propagación de la luz.

2.1.1. Reflexión interna total

El primer fenómeno a estudiar se relaciona con el mecanismo que permite que la luz permanezca confinada dentro de la fibra óptica. Este fenómeno es posible gracias a las leyes que dominan la reflexión y refracción de la luz, los estudios experimentales permiten definir las siguientes leyes al respecto [24]:

1. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, yacen todos en el mismo plano.
2. El ángulo del rayo reflejado (θ_1') es igual al ángulo de incidencia (θ_1), pero reflejado en el eje normal a la superficie de la interfaz.
3. La relación entre el ángulo del rayo **incidente** (θ_1) y el ángulo del rayo **transmitido** o **refractado** (θ_2) viene dada por la ley de Snell:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \tag{1}$$

Donde:

- n_1 : Índice de refracción del medio 1.
- n_2 : Índice de refracción del medio 2. Como se puede observar en la figura 2.

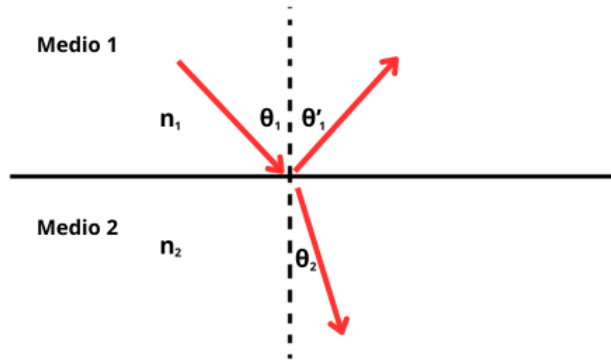


Figura 2: Transmisión y reflexión de un rayo de luz, las flechas rojas representan los rayos de luz.

Analizando la ecuación 1, es posible definir un ángulo para el cual no habrá transmisión, solo reflexión. Este es el **ángulo de reflexión interna total** (RIT), y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\theta_{RIT} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{2}$$

Donde θ_{RIT} es el ángulo de reflexión interna total[25]. Esta definición es fundamental para comprender cómo se establece la reflexión interna total en la fibra óptica, cuya estructura típica se muestra en la figura 3.

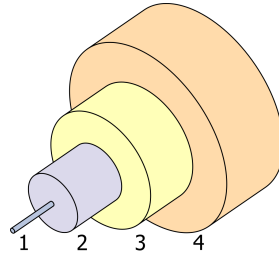


Figura 3: Estructura típica de una fibra monomodo [39]

La fibra óptica consta de [26]:

1. **Núcleo:** Fabricado con vidrio de sílice, con radio a e índice de refracción n_1 .
2. **Revestimiento:** Compuesto de otro material dieléctrico, con radio b e índice de refracción n_2 .
3. **Buffer y Aislante:** Proporciona protección contra daños mecánicos.

Tanto el núcleo como el revestimiento están hechos de materiales que permiten la propagación de la luz pero con diferentes índices de refracción. La intención de esta configuración es lograr la reflexión interna total para un rayo de luz, permitiendo que este se propague reflejándose en la interfaz núcleo-revestimiento, y manteniéndose en el núcleo gracias al ángulo de reflexión interna total (θ_{RIT}) deducido en la ecuación 2.

Este concepto da lugar a una estructura imaginaria conocida como **cono de aceptación**, que delimita todos los rayos de luz que se propagan en la fibra mediante reflexión interna total y aquellos que no lo harán.

En resumen, cualquier rayo de luz emitido fuera del cono de aceptación se refractará en el revestimiento haciendo que estos no se propaguen [27].

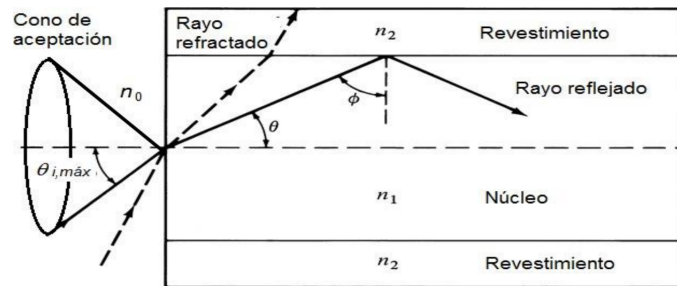


Figura 4: Cono de aceptación en una fibra óptica [13]

Este primer concepto físico es fundamental para comprender la propagación de la luz en la fibra óptica: los rayos de luz se propagan por la fibra al reflejarse en la interfaz núcleo-revestimiento manteniéndose dentro del núcleo, gracias al fenómeno de reflexión interna total.

2.1.2. Caracterización de un haz de luz en una fibra óptica

Hasta el momento, hemos conceptualizado la luz como un “rayo“, una representación acertada pero intrínsecamente limitada. La idea de la luz como un rayo sugiere la imagen de partículas reflejándose en la interfaz núcleo-revestimiento. Sin embargo, la luz exhibe un comportamiento dual onda-partícula, en particular, podemos describirla como una onda electromagnética, y todas sus dinámicas están regidas por las ecuaciones de Maxwell[27]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{4}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{5}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \tag{6}$$

Con el objetivo de caracterizar la luz que se transmite por una fibra óptica es necesario resolver estas ecuaciones bajo condiciones de borde específicas. En esta memoria, nos enfocaremos exclusivamente en fibras monomodo, las cuales tienen un perfil de índice de refracción escalonado, como el observado en la figura 5.

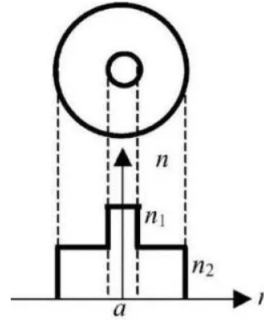


Figura 5: Distribución del índice de refracción de una fibra escalonada [13]

Considerando un perfil escalonado, como se muestra en la figura 5, y pérdidas distribuidas α , podemos utilizar las ecuaciones de Maxwell para obtener el comportamiento del campo eléctrico en la fibra.

Las soluciones generales para la propagación del campo eléctrico son las siguientes [13]:

■ **Para el núcleo:**

$$E(r, z, \phi) = AJ_v(ur)e^{jv\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}e^{-\alpha z} \quad (7)$$

■ **Para el revestimiento:**

$$E(r, z, \phi) = CK_v(wr)e^{jv\phi}e^{j(\omega t - \beta z)}e^{-\alpha z} \quad (8)$$

Donde:

- $E(r, z, \phi)$: Campo eléctrico propagado.
- r : Distancia desde el centro de la fibra hacia el exterior, de forma radial.
- z : Longitud a lo largo de la fibra.
- ϕ : Ángulo azimutal (transversal a la fibra).
- J_v : Función de Bessel del primer tipo.
- K_v : Función de Bessel del segundo tipo.
- j : Unidad imaginaria ($\sqrt{-1} = j$).
- ω : Frecuencia angular de la luz.
- β : Constante de fase, que indica cómo cambia la fase del campo al propagarse en el espacio.
- α : Constante de atenuación, que indica el ritmo de decaimiento del campo eléctrico en la propagación.
- v : Número entero que determina la simetría angular.
- A, C : Constantes de continuidad, asociadas a condiciones de borde entre el núcleo y el revestimiento.

Las ecuaciones 7 y 8 representan las soluciones generales para la propagación del campo eléctrico. Sin embargo, debemos establecer restricciones para las variables, como la amplitud del campo y el valor de v . Este último está relacionado con la continuidad radial. Otra consideración que se debe tener es que la emisión de la luz ocurre dentro del cono de aceptación, haciendo que la ecuación 8 no sea considerada en esta memoria, ya que la magnitud de este campo debería ser muy baja en condiciones normales.

A continuación, se analizará la ecuación 7. Ésta puede descomponerse en distintos términos por sus dependencias en ϕ , r , z , y t :

$$E(t, r, \phi, z) = AE_{r\phi}(r, \phi)E_{tz}(t, z) \quad (9)$$

Donde:

- $$E_{r\phi}(r, \phi) = J_v(ur)e^{jv\phi} \quad (10)$$

- $$E_{tz}(t, z) = e^{j(\omega t - \beta z)} e^{-\alpha z} \quad (11)$$

Es evidente que la parte definida por la ecuación 10 es invariante en t y en z . Por lo tanto, para fines de análisis de propagación, esta información es omitible, ya que en términos prácticos y de cálculos, estas variables se comportarán como constantes. Por lo tanto, podemos simplemente analizar la parte del campo eléctrico que sí es relevante para el cálculo, haciendo abuso de notación:

$$E(t, z) = E_0 e^{j\omega t - z\gamma} \quad (12)$$

Donde:

- $\gamma = j\beta + \alpha$
- $E_0 = A$: Amplitud del campo eléctrico.

Incluso podemos aplicar una transformada fasorial, analizando únicamente el cambio de fase asociado al parámetro γ , resultando en:

$$E(z) = E_0 e^{-z\gamma} \quad (13)$$

Las ecuaciones 12 y 13 son las representaciones más comunes para trabajar la propagación del campo eléctrico en una fibra óptica. En este escrito se hace uso de ambas notaciones, diferenciándolas únicamente por las dependencias temporales y espaciales. Es crucial recordar que éstas no representan el campo eléctrico completo, sino que son simplificaciones que utilizan abusos de notación para facilitar los cálculos futuros.

2.1.3. Modos de propagación y parametrización

Como se vio en la sección anterior se analizaron las soluciones generales de la luz para que se propague en la fibra óptica. Sin embargo, aun queda por examinar un aspecto crucial relacionado con los parámetros que definen la forma en como la luz se propaga.

En la ecuación 7, aparece el término v , que define el orden de la función de Bessel utilizada en la solución. Sin embargo, este valor no puede ser arbitrario; es necesario mantener la continuidad para los campos eléctricos y magnéticos, lo que impone restricciones sobre el valor de v .

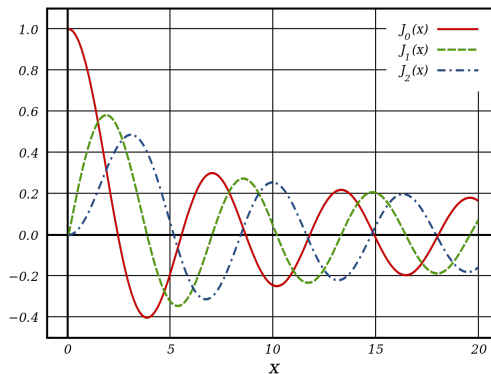


Figura 6: Funciones de Bessel de primer tipo [40]

En la figura 6 se observa la forma de las funciones de Bessel de primer tipo. Debido a su naturaleza oscilatoria, estas funciones alcanzan valores específicos en más de una ocasión. Es decir, para cada valor de v , existen una serie de raíces m que satisfacen las condiciones de continuidad para la función de Bessel. Esto nos permite definir un par v y m , que a su vez definen los llamados **modos de propagación**. Estos describen la distribución radial de los campos dentro de la fibra.

En términos generales, la limitación de la existencia de modos dentro de una fibra óptica está dada por la relación de tamaño entre la longitud de onda de la luz y el núcleo de la fibra. Cuanto más grande sea el núcleo en comparación con la longitud de onda, **más modos de propagación existirán en la fibra**. Podemos clasificar los modos como HE_{vm} si el campo magnético es mayor que el campo eléctrico o, por el contrario, como EH_{vm} si no se cumple dicha condición.

Dado que cada modo de propagación tiene una distribución única dentro del núcleo, cada uno se propaga a diferentes velocidades. Esto lleva a la necesidad de definir un **índice de refracción efectivo** o \bar{n} , que dependerá de la velocidad de propagación de cada modo. Asimismo, esto implica que β también dependerá de los modos de propagación.

En este punto se hace relevante introducir el parámetro V , también conocido como frecuencia normalizada, que indica de cuántas maneras se puede distribuir la onda electromagnética óptica dentro de la fibra. Para fibras escalonadas, este parámetro se calcula como:

$$V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (14)$$

A medida que el valor de la frecuencia normalizada aumenta, se presentan más modos de propagación en la fibra. Podemos relacionar este parámetro con otro llamado **constante de fase normalizada**, denotada por b . La relación entre ambas viene dada por condiciones de factibilidad discutidas al inicio de esta sección. Esto se puede obtener mediante métodos numéricos, obteniendo curvas de constante de fase normalizada en función de la frecuencia normalizada, es decir, curvas del tipo $b(V)$. Existirán varias curvas asociadas a los distintos modos de propagación presentes en la fibra.

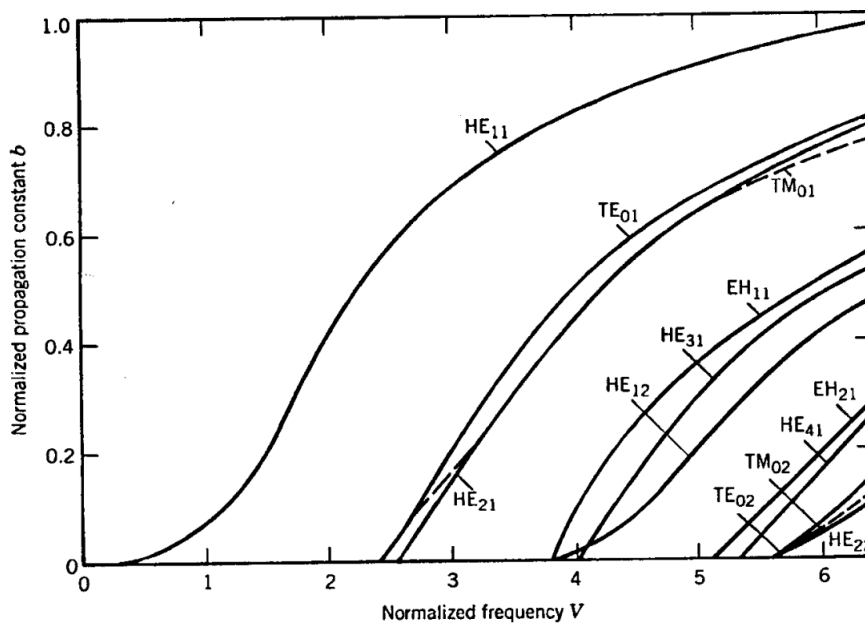


Figura 7: Gráfico de $b(V)$ para distintos modos de propagación, se calcula asumiendo una gran diferencia entre los valores de n_1 y n_2 [13]

En la figura 7 se pueden observar distintas curvas $b(V)$ para distintos modos de propagación, así mismo, es posible ver que si el valor de V supera los 2,405, más de un modo se propagará en la fibra. De aquí se deriva la definición de fibra monomodo, aquella en la cual, dada la relación entre la longitud de onda y el diámetro del núcleo, solo se propagará un único modo (HE_{11}). Por el contrario, una fibra multimodo es aquella en la cual más de un modo se propagará.

La variable b está directamente relacionada con el **índice de refracción efectivo** mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{n} = n_2 - b(n_2 - n_1) \quad (15)$$

Al desnormalizar b , obtenemos el valor de β para el modo de propagación y la longitud de onda óptica correspondiente. Esta tarea se puede llevar a cabo con la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{b(n_1^2 - n_2^2) + n_2^2} \approx k_0 \bar{n} \quad (16)$$

Donde $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

En resumen, si conocemos la longitud de onda del láser y los parámetros de la fibra óptica, podemos obtener la frecuencia normalizada V . Utilizando métodos numéricos, podemos obtener el valor de b a partir de V , y a partir de este, obtener \bar{n} y β . Finalmente, tenemos un sistema para obtener toda la información necesaria sobre los modos de propagación que se presentarán en la fibra y sus propiedades[14].

2.2. Dispersión de Rayleigh

Teniendo un entendimiento de la manera en que la luz como onda-partícula se propaga por una fibra, se puede estudiar el principal fenómeno físico que es protagonista de los sistemas OTDR: la dispersión de Rayleigh. Este es un fenómeno físico descrito por primera vez en el siglo XIX por Lord Rayleigh[15][16], que se produce a causa de la capacidad de polarización de las partículas, es decir, la capacidad que tienen sus cargas internas para interactuar con las ondas electromagnéticas.

Cuando partículas que pueden polarizarse entran en contacto con la luz, que es una onda electromagnética, empiezan a vibrar. Estas vibraciones resultan en la radiación de ondas electromagnéticas[30]. Las dispersiones de esta naturaleza pueden dividirse en dos tipos: dispersión de Rayleigh y dispersión de Mie.

Ésta memoria se centra exclusivamente en la dispersión de Rayleigh, dada la relevancia de ésta frente a la dispersión Mie en sistemas OTDR.

Este fenómeno produce pequeñas vibraciones en las partículas, las cuales actúan como un dipolo radiador como se muestra en la figura 8 [17]. Esto significa que la onda electromagnética radiada tendrá un patrón en el cual por sobre y por debajo del eje de vibración no existirá onda dispersada, mientras que a los laterales si existirá onda dispersada.

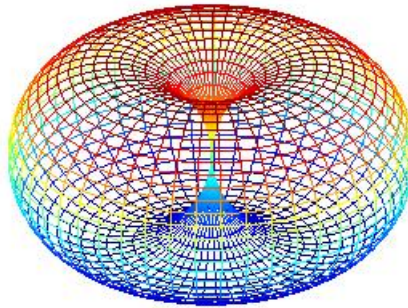


Figura 8: Patrón de radiación dipolar, en el eje vertical se encuentra el eje de vibración, la distancia entre el centro de la figura y los puntos de la superficie representan la potencia a la que irradia

En la interacción de la dispersión de Rayleigh, dos fuerzas son predominantes [18]:

- Fuerza restauradora: Ocasionada por las fuerzas internas al átomo o molécula, que mantiene unidos a los electrones al átomo. Esta interacción define una frecuencia de resonancia.
- Fuerza electromagnética externa: Ocasionada por el campo electromagnético que interactúa con el átomo, en este caso particular, la onda de luz.

La magnitud de la onda dispersada es proporcional a la cercanía que hay entre la frecuencia de la luz y la frecuencia de resonancia de la partícula dispersante. Asumiendo que la partícula dispersante tiene un tamaño mucho menor a la longitud de onda, se puede obtener un patrón de radiación para la intensidad [32]:

$$I_s = I_0 \frac{1 + \cos^2(\theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6 \quad (17)$$

Donde:

- I_s : Intensidad de la onda dispersada.
- I_0 : Intensidad de la onda incidente.
- θ : Ángulo de elevación, respecto al ángulo de vibración.
- λ : Longitud de onda de la luz incidente.

- n : Índice de refracción del medio.
- R : Distancia desde el origen de radiación.
- d : Diámetro de la esfera que actúa como centro de dispersión o scattering

Si analizamos la dispersión de Rayleigh producida por moléculas aisladas, la ecuación se simplifica a [33]:

$$I_s = I_0 \frac{\pi^2 \alpha^2}{\epsilon_0 \lambda^4 R^2} \frac{1 + \cos^2(\theta)}{2} \quad (18)$$

Donde α es la polarizabilidad de la molécula.

Es debido a esta última ecuación que el cielo adquiere su color, ya que la intensidad que más se dispersa en el espectro visible es la de color azul, como se muestra en la figura 9 [19].

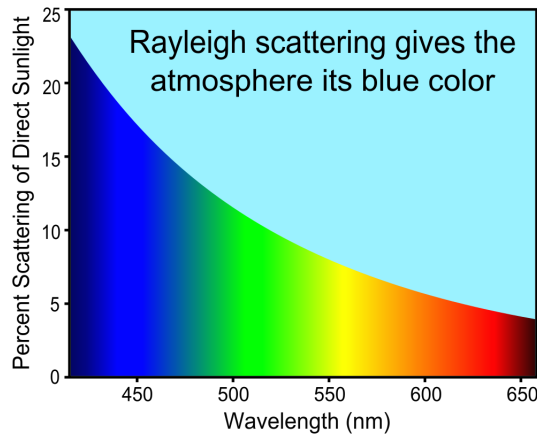


Figura 9: Nivel de dispersión en función de la longitud de onda [34]

Independientemente del origen del scattering, dadas las aproximaciones, la intensidad de la onda dispersada es proporcional a $1/\lambda^4$.

En resumen, la dispersión de Rayleigh corresponde a un fenómeno en el cual las partículas vibran ante la perturbación de una onda electromagnética, estas actúan como dipolo radiador, dispersando parte de la onda incidente en varias direcciones.

2.3. Dispersión de Rayleigh en fibra óptica

Hasta el momento nos hemos referido a la dispersión de Rayleigh siempre con una luz que viaja por el vacío y se encuentra con partículas discretas, sin embargo, la dispersión de Rayleigh puede generalizarse a variaciones en el índice de refracción. Así, cuando una onda de luz se propaga por un medio homogéneo y se encuentra con una discontinuidad de tamaño mucho menor que la longitud de onda de la luz, ésta produce dispersión de Rayleigh. A estas discontinuidades que producen dispersión se les conoce como centros de dispersión o scattering.

De esta forma cuando la luz se encuentra con un volumen V de constante dieléctrica ϵ diferente de un promedio $\bar{\epsilon}$, esto produce la dispersión de la luz según la siguiente ecuación [35]:

$$I_s = I_0 \frac{\pi^2 V^2 \sigma_\epsilon^2}{2 \lambda^4 R^2} (1 + \cos^2(\theta)) \quad (19)$$

Donde σ_ϵ es la varianza de las fluctuaciones de la constante dieléctrica ϵ .

En el caso de las fibras ópticas, estas variaciones de la constante dieléctrica son comunes, y se manifiestan por medio de variaciones en el índice de refracción [36]. La fibra óptica se fabrica de manera que es inevitable que existan variaciones del índice de refracción de tamaño microscópico, pero en promedio, la fibra posee un perfil de índice de refracción constante n_1 y n_2 en toda su longitud. Sin embargo, al inspeccionar los índices de refracción a un punto nanoscópico, existen variaciones. Cada una de estas variaciones causa dispersión de Rayleigh.

Además, como se ha explicado anteriormente dentro de los tipos de pérdida que existen en la fibra óptica, la que tiene mayor contribución suele ser la dispersión de Rayleigh (figura 10). De lo anterior, se puede evidenciar que a medida que la longitud de onda aumenta, las pérdidas asociadas a la dispersión de Rayleigh disminuyen, esto es debido a los principios físicos explicados en la sección 2.2.

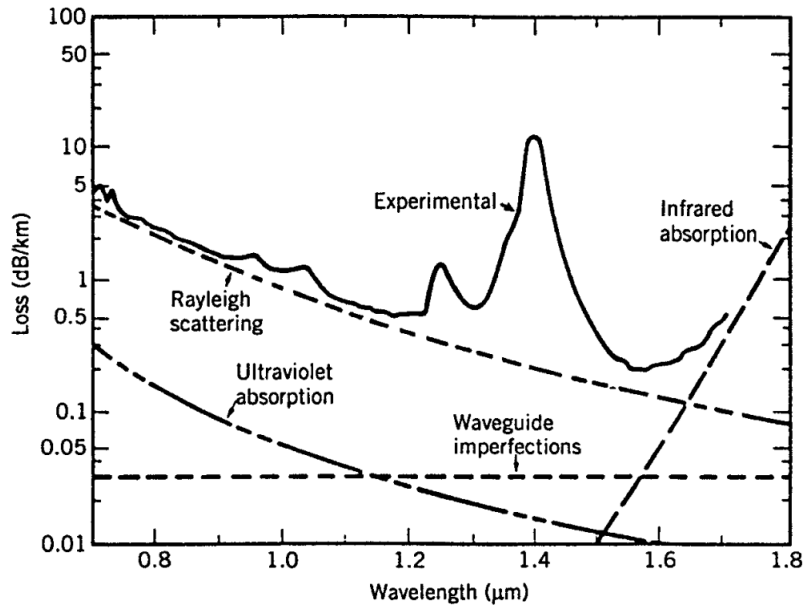


Figura 10: Perfil de pérdidas en función de la longitud de onda [13]

Dada la importancia de estas pérdidas asociadas a la dispersión de Rayleigh es que ha sido objeto de estudio en diversas ocasiones.

Además, como es posible observar en la figura 10, es evidente que estas pérdidas, junto con la absorción infrarroja, son las principales responsables de la mayoría de las pérdidas en las fibras ópticas. Es por esto mismo que la longitud de onda usada preferentemente en la actualidad es de 1550 nm, ya que esta minimiza las pérdidas asociadas [21].

Inicialmente, la dispersión de Rayleigh puede parecer un efecto intrínsecamente negativo, ya que dispersa parte de la intensidad de la luz enviada, lo que en última instancia contribuye a limitar las distancias máximas de transmisión posibles. Sin embargo, se ha podido aprovechar este fenómeno para el desarrollo de tecnologías modernas. Para comprender esto plenamente, es necesario entender cómo se propaga la dispersión de Rayleigh a lo largo de la fibra óptica.

Cuando la luz se propaga por la fibra, esta se encuentra con discontinuidades que generan dispersión de Rayleigh. La orientación de la vibración dependerá de la polarización de la onda incidente, la cual vendrá dada por la distribución espacial del campo, revisada en la sección 2.1.2. Sin embargo, para fines de análisis, se asume que el centro de scattering radia de manera aleatoria en todas direcciones, como se describe en la figura 11:

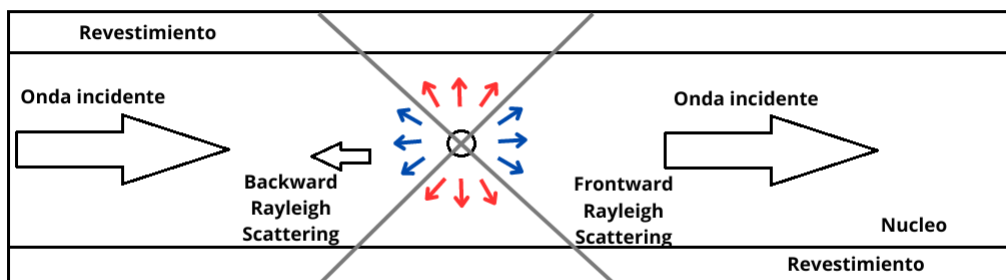


Figura 11: Dispersión de Rayleigh en fibra óptica, el círculo representa un centro de scattering, en rojo se puede observar la luz dispersada fuera del cono de aceptación, mientras que en azul se puede ver la luz dispersada dentro del cono de aceptación,

Como sabemos de la sección 2.1.1, no toda la luz dentro de la fibra se propagará. sino que solamente la luz que tenga la dirección de propagación dentro del cono de aceptación de la fibra óptica. Esto hará que la onda dispersada finalmente pueda ser separada en dos: una onda que se propaga en la misma dirección que la incidente y otra que se propaga en dirección contraria, llamadas **forward Rayleigh scattering** y **backward Rayleigh scattering**

respectivamente[22].

- **Forward Rayleigh Scattering:** Esta onda, se propaga en la misma dirección que la onda incidente, presentando solo diferencias en su polarización. Sin embargo, no posee propiedades especialmente relevantes para esta memoria, por lo que para efectos prácticos no se analizará en esta memoria.
- **Backward Rayleigh Scattering:** Esta onda, que se propaga en sentido contrario a la onda incidente, representa la onda más común y de mayor magnitud entre las ondas de backward scattering. Por lo mismo, es normal escribirla simplemente como Backscattering. Esta onda se produce en función de las propiedades de la onda incidente y de la fibra, por lo tanto nos puede brindar información muy útil sobre la fibra y/o su entorno. Esto se estudiará en profundidad en las siguientes secciones.

La onda de backscattering no es diferente a la onda incidente en relación a sus propiedades propagativas. Por lo tanto, se comporta de manera idéntica a las ondas analizadas en la sección 2.1. Haciendo uso de la notación explicada en la ecuación 13, se puede asumir una relación entre la onda incidente E_{in} y la onda reflejada E_{BS} en el centro de scattering[51], dada por:

$$E_{BS} = rE_{in} \tag{20}$$

Donde r es un número real llamado **reflectividad** entre cero y uno. Explícitamente, dicha reflectividad viene dada por la ecuación 19, teniendo en cuenta que la intensidad se puede calcular como el cuadrado del módulo del campo eléctrico, si consideramos que la onda óptica es plana.

$$r = \frac{\pi V \sigma_{\epsilon}}{\sqrt{2} \lambda^2 R} \sqrt{(1 + \cos^2(\theta))} \tag{21}$$

Finalmente tenemos una teoría que explica de qué manera se producen las llamadas ondas de backscattering en una fibra óptica por medio de la dispersión de Rayleigh y explicar su utilización en la técnica de OTDR. Además, se realizó un modelado sencillo para simplificar el aporte de los centros de scattering a un coeficiente real llamado reflectividad.

2.4. Reflectometría óptica en dominio temporal (OTDR)

La reflectometría óptica en dominio temporal (OTDR por sus siglas en inglés) es una técnica utilizada desde hace mucho tiempo que aprovecha el backscattering para extraer información sobre el estado y características de la fibra.

Sin embargo, aún queda una interrogante que debe ser resuelta, la cual consiste en cómo recuperar la señal de backscattering. Para resolver eso, es posible utilizar un componente de los sistemas de fibra óptica denominado circulador, el cual tiene como función redirigir la luz en función de su dirección de propagación. Gracias a la existencia de este componente es posible extraer la onda de backscattering, según se muestra en el esquema de funcionamiento de la figura 12 [51].

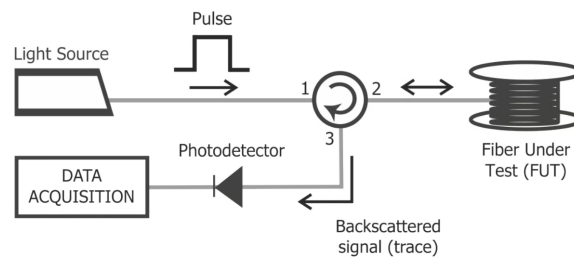


Figura 12: Sistema OTDR típico, light source representa el emisor, Pulse representa el pulso enviado, Fiber Under Test representa la fibra óptica que se encuentra bajo prueba, Backscattered signal representa la onda de backscattering, el photodetector representa el fotodetector, data acquisition representa el sistema electrónico que recibe los datos desde el fotodetector, el círculo con la flecha representa el circulador. [51]

Donde:

- Light Source o emisor: Suele ser un láser incoherente.
- Pulse o Pulso: De ancho temporal τ_e , y ancho espacial $\tau_e V_p = \frac{\tau_e c}{\bar{n}}$, donde V_p representa la velocidad de propagación, \bar{n} representa el índice de refracción promedio en la fibra y c es la velocidad de la luz.

- **Circulador:** Es capaz de redirigir la luz que se propaga. La luz que se envía por el puerto 1, sale por el puerto 2 y la información que entra al puerto 2 sale por el puerto 3. Esto permite redireccionar el backscattering hacia un sistema de adquisición de datos.
- **Fibra testeada (FUT):** Es la fibra que se encuentra bajo estudio.
- **Módulo de adquisición de datos:** Esta conectado al fotodetector y se encarga de medir la intensidad de la luz y de generar las llamadas “trazas OTDR“. Estas ultimas son **discretas** y se conforman por una serie de puntos asociados a las mediciones secuenciales realizadas.

Los sistemas OTDR se basan en la emisión de un pulso incoherente de ancho temporal τ_d . Dicho pulso genera de manera continua una onda de backscattering (también incoherente) a medida que se propaga por la fibra, esta última se muestrea a una frecuencia de muestreo " f_s " determinada por un convertidor análogo digital en recepción.

Para explicar el principio de funcionamiento, se asume, por simplicidad, que los centros de scattering se encuentran dispersos en la fibra óptica de manera homogénea, separados por una distancia de L_{sca} . Se utilizan diagramas, como el de la figura 13, para explicar el principio de funcionamiento.

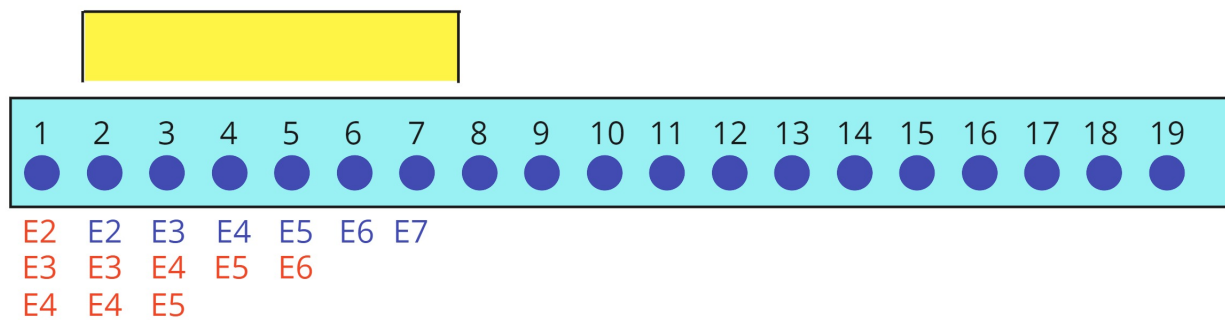


Figura 13: Esquema para la explicación del principio de funcionamiento de un sistema OTDR

La figura 13 representa la propagación de un pulso de luz en un instante t y debe ser interpretada de la siguiente manera:

- En la figura 13, el inicio de la fibra óptica se encuentra a la izquierda. La luz se propaga de izquierda a derecha.
- El rectángulo celeste representa una fibra óptica de longitud L . Los círculos azules dentro de la fibra óptica representan los centros de scattering numerados del 1 al 19.
- El rectángulo amarillo sobre la fibra óptica representa un pulso de luz que ilumina los centros de scattering. En el ejemplo de la figura 13 ilumina los centros de scattering del 2 al 7.
- Abajo de la fibra óptica se observan los campos eléctricos de backscattering que se encuentran en las posiciones de los centros de scattering, indicados por una letra **E** y un subíndice **k**. El subíndice del campo eléctrico indica el centro de scattering que le dio origen.

En azul se observan los campos eléctricos que han sido generados en el instante t que representa el diagrama, mientras que en rojo se observan los campos eléctricos de backscattering que han sido generados en instantes anteriores a t y que se han propagado en dirección al inicio de la fibra.

De esta forma, en la figura 13, en la posición del centro de scattering 1 se pueden encontrar los campos eléctricos de backscattering generados por los centros de scattering 2, 3 y 4 en un instante anterior al que muestra el diagrama. Estos campos deben propagarse según la teoría estudiada en la sección 2.1.

Otro ejemplo: en la posición del centro de scattering 2 se encuentran los centros de scattering 2, 3 y 4. Donde el primero fue generado en ese instante, los otros dos fueron generados en instantes pasados.

Una vez estudiada la lectura del diagrama, se explica el principio de funcionamiento de la técnica OTDR. Para el ejemplo, se asume que el pulso emitido tiene una longitud espacial D tal que cubre 6 centros de scattering. Es importante recordar que estos, por simplicidad, se asumen homogéneamente distribuidos en la fibra óptica.

El tiempo transcurrido entre diagramas viene dado por $\Delta t = L_{sca}/V_p$, donde V_p es la velocidad de propagación de la luz en la fibra óptica; es decir, el tiempo entre diagramas es suficiente para que el pulso alcance un nuevo centro de scattering.

Las figuras 14 muestra el periodo de tiempo durante el cual el pulso se está emitiendo.

La figura 14 (a) muestra un primer instante en el cual el pulso alcanza el primer centro de scattering, y en consecuencia genera el primer campo eléctrico de backscattering.

En la figura 14 (b) se puede observar el instante siguiente a la figura 14 (a), donde el pulso alcanza el segundo centro de scattering y sigue iluminando al primero, lo que hace que en este instante se generen sus respectivos campos eléctricos. El campo generado en la figura 14 (a) se propagó hacia la izquierda, alcanzando el inicio de la fibra, por lo tanto, no se muestra en el diagrama.

En la figura 14 (c) se puede observar cómo ahora hay 3 centros de scattering iluminados, los cuales generan, en ese mismo instante, 3 campos eléctricos. Por otro lado, el campo eléctrico generado por el segundo centro de scattering en el instante representado por la figura 14 (b) se propaga a la posición del primer centro de scattering. De esta manera, en la posición del primer centro de scattering se encuentra el campo eléctrico generado por el primer centro de scattering y el campo eléctrico generado en el segundo centro de scattering pero propagado hasta esa posición, según lo estudiado en la sección 2.1.

En las figuras 14 (d), (e) y (f) se puede observar la propagación del pulso de luz y la forma en que el campo eléctrico de backscattering se propaga hacia el inicio de la fibra.

En la figura 14 (f) el pulso ha sido emitido por completo. De esta manera, el ancho espacial del pulso de luz D cubre 6 centros de scattering. En la posición del primer centro de scattering se pueden encontrar:

- El campo eléctrico generado en el primer centro de scattering en ese mismo instante.
- El campo eléctrico generado por el segundo centro de scattering en el instante representado por la figura 14 (e), propagándose desde la posición del segundo centro de backscattering al primer centro de scattering.
- El campo eléctrico generado por el tercer centro de scattering en el instante representado por la figura 14 (d), propagándose desde la posición del tercer centro de scattering al primer centro de scattering.

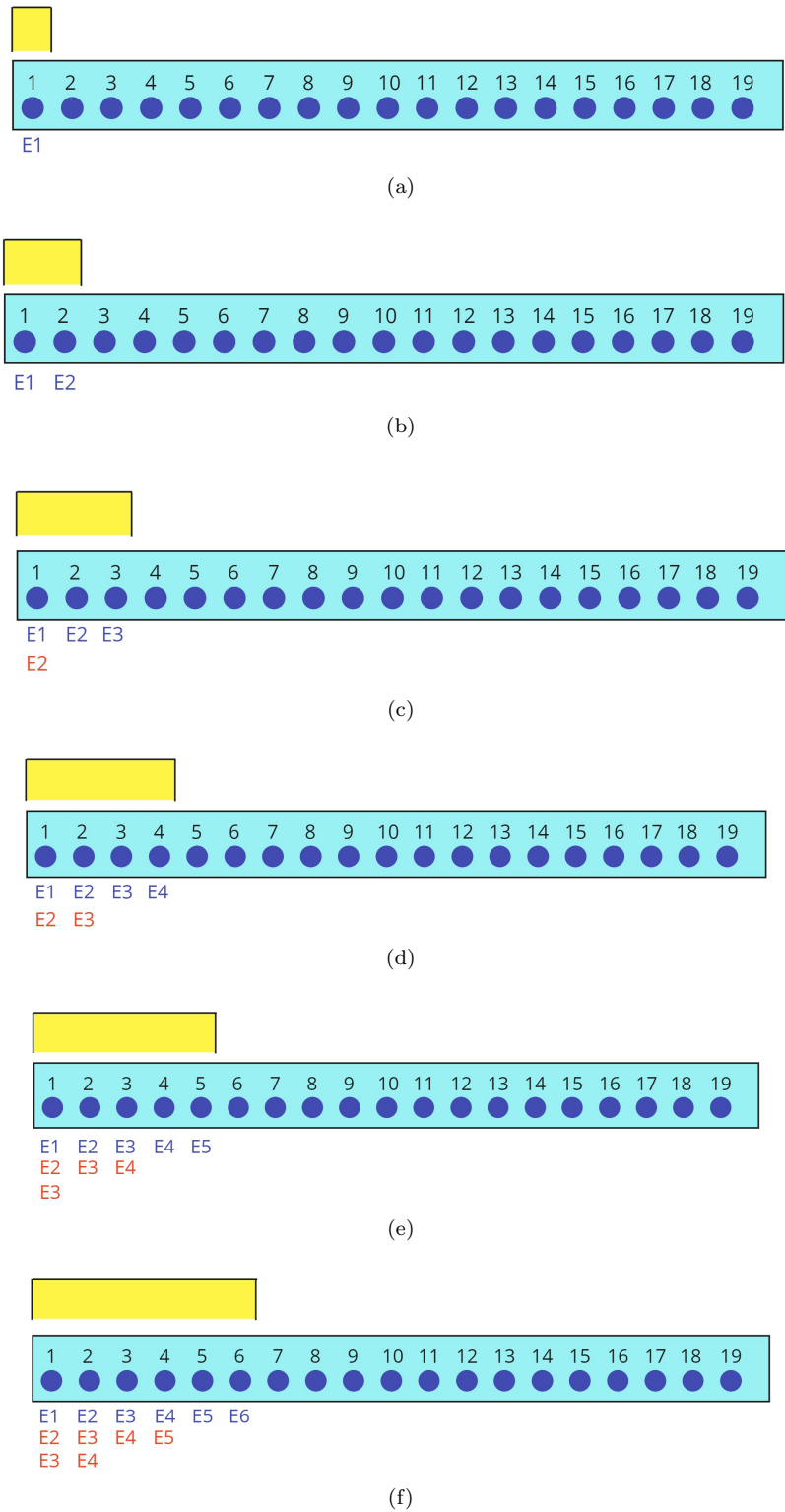


Figura 14: Diagrama del principio de funcionamiento de un sistema OTDR hasta que el pulso es emitido por completo a la fibra. (a) Primer instante. (b) Segundo instante. (c) Tercer instante. (d) Cuarto instante. (e) Quinto instante. (f) Sexto instante.

Las figuras 15 muestra el pulso emitido propagándose por la fibra mientras genera backscattering.

La figura 15 (a) muestra el punto en el cual el primer centro de scattering deja de estar iluminado y, por lo tanto, ya no genera campo eléctrico. Esto se puede observar en el hecho de que en la posición del primer centro de scattering no hay campos eléctricos generados en ese instante. De esta forma, todos los campos que se encuentran en esa posición fueron generados por centros de scatterings diferentes al primero en instantes pasados.

Las figuras 15 (b) y (c) muestran la propagación del pulso hasta el momento en que este llega al noveno centro de scattering.

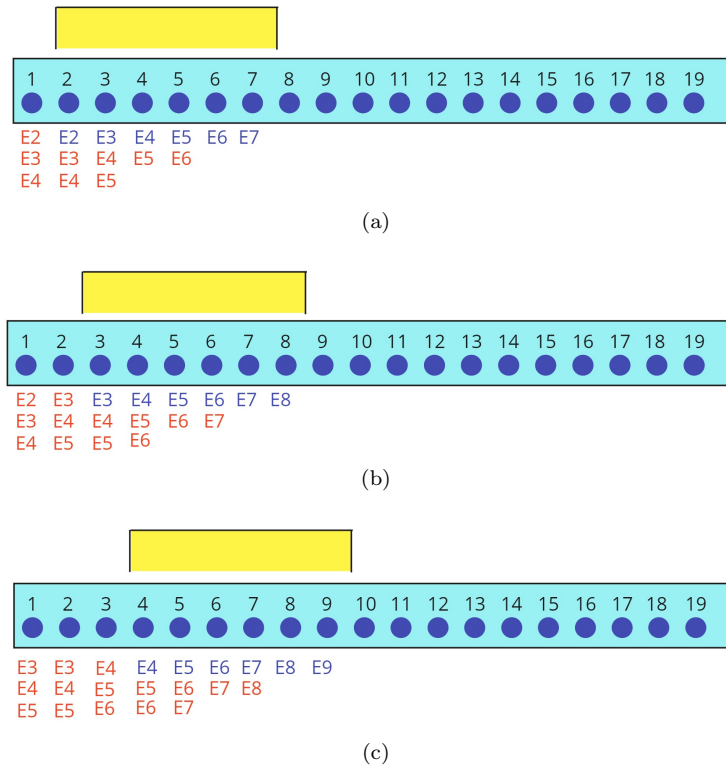


Figura 15: Diagrama del principio de funcionamiento de un sistema OTDR primeros instantes del pulso recién emitido. (a) Primer instante. (b) Segundo instante. (c) Tercer instante.

De las figuras 14 y 15 se observa que el pulso incidente se desplaza simultáneamente y en dirección contraria a los campos eléctricos de backscattering. Esto tiene como consecuencia la generación de combinaciones de los campos eléctricos de backscattering generados en distintas posiciones. Este fenómeno se puede apreciar en cualquier instante de la figura 15, donde en cada posición de los centros de scattering presenta campos eléctricos generados en posiciones diferentes. Tanto el pulso como las ondas de backscattering tienen la misma velocidad de propagación, esto hace que cada combinación de campos eléctricos que llegan al inicio de la fibra contengan información sobre los centros de scattering iluminados por la mitad del pulso.

Por ejemplo, en la figura 15 (a) el campo generado por el tercer centro de scattering llega al inicio de la fibra con información sobre los campos eléctricos asociados al tercer, cuarto y quinto centro de scattering (E3, E4 y E5).

Esto implica que toda la información extraíble de los campos de backscattering detectados puede haber sido causada por cualquiera de los centros de scattering que generaron dichos campos.

Por ejemplo, en la figura 15 (b), si al capturar los campos de backscattering de la posición del centro de scattering 1 se detecta información relevante, dicha información podría ser atribuible a cualquiera de los 3 centros de scattering que produjeron los campos asociados a esa medición, es decir, los centros de scattering 2, 3 o 4.

Esto define un parámetro llamado resolución espacial W , el cual indica la mínima distancia a la que deben estar separados dos fenómenos para poder diferenciarlos en los campos de backscattering.

W está definida por [38]:

$$W = \frac{D}{2} = \frac{\tau_d V_p}{2} = \frac{\tau_d c}{2n} \tag{22}$$

Donde τ_d representa la duración del pulso temporal, V_p es la velocidad de propagación y c es la velocidad de la luz en el vacío.

De esta manera, toda la información captada por el módulo de adquisición de datos, en un instante dado, identificará un rango espacial en la fibra. Esta es una de las razones por las cuales el ancho del pulso es importante, ya que define la resolución espacial del sistema OTDR.

Cada medición del sistema de adquisición de datos se asocia tanto a un tiempo t como a una distancia d . Esta última está determinada por la distancia que ha recorrido la luz en ese tiempo:

$$d = V_p t / 2 \tag{23}$$

De esta manera, cada punto de las trazas caracteriza un rango de distancias en la fibra óptica, que va desde $d = V_p t / 2$ hasta $d + W$.

Dado a que la luz pierde intensidad a medida que se propaga estas variaciones en la intensidad se pueden medir en los campos eléctricos de backscattering, esto permite caracterizar el estado de la fibra y sus características de pérdidas por medio del estudio de esta traza.

En la figura 16 se puede observar una traza OTDR típica, donde el eje de las ordenadas representa la distancia en metros y el eje de la abscisas representa la intensidad en dBm. Los peaks observados corresponden a grandes reflexiones procedentes de discontinuidades como empalmes entre distintas fibras. Además, existe un segmento a la derecha de la figura 16 con gran ruido uniforme, el cual representa que en estos puntos no hay fibra óptica, es decir, la longitud de la fibra viene dada por el punto donde inicia dicho segmento.



Figura 16: Traza OTDR Común [41]

Gracias a las pendientes y al conocimiento de parámetros básicos de la fibra, podemos calcular las pérdidas de la misma y su longitud a partir de una traza OTDR.

La detección del último punto de la traza ocurre en el momento en que el backscattering generado en el extremo final de la fibra, retorna al punto de origen de la misma. Si se emite otro pulso después de ese momento y se repite la generación de la traza, obtendremos otra traza, asociada a la misma fibra pero en un instante diferente. Esto define una segunda frecuencia de muestreo "lenta" f_{sl} , la cual indica la frecuencia en la que se emiten los pulsos.

Considerando que un correcto funcionamiento del sistema requiere evitar solapamientos entre los pulsos incidentes y las ondas de backscattering generadas, se define un valor máximo para f_{sl} que se alcanza cuando se emite un nuevo pulso justo después de que se captura el último punto de la traza [47]. Esta frecuencia se expresa como:

$$f_{sl} = \frac{V_p}{2L} \quad (24)$$

Esta frecuencia delimita qué tan rápido es posible detectar cambios en la fibra óptica. Gracias al teorema de reconstrucción de Nyquist[37], se sabe que la máxima frecuencia de una perturbación detectable viene dada por:

$$F_{smax} = \frac{f_{sl}}{2} = \frac{V_p}{4L} \quad (25)$$

A esta frecuencia también se le llama ancho de banda acústico.

2.5. Phase Sensitive OTDR

Hasta el momento, se ha abordado el uso de la dispersión de Rayleigh en fibras ópticas bajo la condición de que el láser que se usa genere una luz incoherente, logrando que el ancho espectral de la fuente sea amplio. Dado que los reflectores son altamente dependientes de la longitud de onda, el campo recibido en el fotodetector se compone de la mezcla de varias longitudes de onda (como se estudió en la sección 2.3). Como consecuencia, las respuestas de fase se promedian entre sí, filtrando la aleatoriedad generada por los centros de scattering y manteniendo únicamente la información determinista, es decir, el valor medio de la potencia retro-dispersada de la fibra y por otro lado, perdiendo la información sobre la fase en la propagación de la luz [55]. Es por esto que las curvas observadas en las trazas OTDR son suaves, a pesar de que el origen de estas proviene de reflectores aleatorios.

No obstante, si se utiliza una fuente altamente coherente, se pierde la información sobre la potencia media dispersada, ya que los campos no se promedian y, por lo tanto, la traza estará dominada por la aleatoriedad de los reflectores. Sin embargo, esta situación implica una segunda consecuencia: debido a la alta dependencia de la longitud de onda de la dispersión de Rayleigh la información de la fase propagada de la luz, se mantiene.

De este principio surge la técnica Phase Sensitive OTDR, o simplemente Φ OTDR (PhiOTDR). Gracias a esta técnica, es posible adquirir información sobre vibraciones, también conocidas como perturbaciones acústicas, y obtener

información sobre cambios de temperatura. Esto gracias a que estas perturbaciones se manifiestan como cambios de fase en la propagación de la luz, permitiendo la creación de sistemas como "DAS" (Distributed Acoustic Sensor) y "DTS" (Distributed Temperature Sensor).

En la próxima subsección, se profundizará en como las variaciones de fases impactan las trazas del Phase Sensitive OTDR. También abordaremos la manera en que los cambios ambientales inciden en las fases, explorando de qué forma dichas alteraciones pueden manifestarse en las trazas. Además, examinaremos cómo estas trazas se convierten en valiosas fuentes de información, permitiendo la extracción de datos significativos. Este análisis profundo nos proporcionará una comprensión más completa de la técnica phase sensitive OTDR y sus aplicaciones prácticas, destacando su capacidad para captar y registrar cambios sutiles en el entorno de la fibra óptica [51].

2.5.1. Principio de funcionamiento

La técnica phase sensitive OTDR hace uso de una estructura similar a la técnica OTDR. La mayor diferencia viene dada por el láser que se utiliza para enviar la luz por la fibra. Por lo mismo la gran mayoría de características de un sistema OTDR se mantiene para su versión phase sensitive, como por ejemplo la resolución espacial, la frecuencia de muestreo máxima, entre otros.

Para entender el comportamiento fundamental de estos sistemas es prudente partir desde un caso simplificado e idealizado. Supongamos como primera aproximación al problema un segmento de fibra con un índice de refracción efectivo n , la cual tiene centros de scatterings distribuidos, como se muestra en la figura 17. Para hacer una primera aproximación al problema se analizará un segmento de dicha fibra.

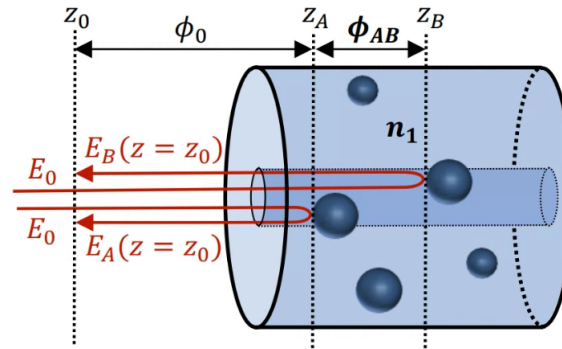


Figura 17: Propagación de backscattering en fibra óptica, las esferas azules representan centros de scattering [51]

Considerando el campo eléctrico incidente en z_0 y en el instante $t = 0$ como:

$$E_{in} = E_0 e^{j\Theta} \quad (26)$$

Donde Θ viene dado por la integración de $\beta(z)$ desde $z = 0$ hasta $z = z_0$. Si consideramos variaciones pequeñas entonces en toda la longitud de la fibra β viene dado aproximadamente por la ecuación 16, por lo cual:

$$\Theta \approx \beta z_0 \quad (27)$$

Ahora, si se considera por términos de simplicidad el campo generado por dos centros de scattering con igual reflectividad r , sin pérdidas en la línea y $\Theta = 0$, uno en el punto z_A y otro en el punto z_B , en cuyo caso el campo total de backscattering en el punto z_0 viene dado por:

$$E_{BST} = r E_0 \exp(j[\omega t - 2\beta z_A]) [1 + \exp(j2\beta(z_A - z_B))] \quad (28)$$

De esto podemos definir

- $2\beta z_A = \Phi_A$, como el ángulo acumulado desde el punto z_0 hasta el punto z_A .
- $2\beta(z_A - z_B) = \Phi_{AB}$, como el ángulo acumulado desde el punto z_A hasta el punto z_B

De forma que la ecuación 28 puede ser reescrita como:

$$E_{BST} = r E_0 \exp(j[\omega t - \Phi_A]) [1 + \exp(j\Phi_{AB})] \quad (29)$$

La intensidad está dada por:

$$I_{BST} = 2(r E_0)^2 [1 + \cos(\Phi_{AB})] \quad (30)$$

Por lo tanto, se deduce que las trazas OTDR pierden la dependencia en la fase, pues si el láser es incoherente entonces la intensidad está dada por [51]:

$$I_{BST} = 2(rE_0)^2 \quad (31)$$

Si en la propagación del pulso desde z_A hasta z_B , aparece una variación de fase $\Delta\Phi$, entonces la ecuación 30 cambia de la siguiente manera:

$$E_{BST} = rE_0 \exp(j[\omega t - \Phi_A])[1 + \exp(j[\Phi_{AB} + \Delta\Phi])] \quad (32)$$

Con una intensidad expresada como:

$$I'_{BST} = 2(rE_0)^2[1 + \cos(\Phi_{AB} + \Delta\Phi)] \quad (33)$$

Las ecuaciones 32 y 33 evidencian que cualquier variación en la fase conlleva alteraciones tanto en la fase como en la amplitud de la onda de backscattering detectada al inicio de la fibra.

Como se ha expuesto en las secciones 2.2 y 2.3, los centros de scattering se generan debido a pequeñas variaciones en el índice de refracción de la fibra. Estas variaciones son resultado de los métodos de fabricación de la fibra y, por ende, son variables estocásticas. Esto implica que tanto las reflectividades como las fases acumuladas se comportan como variables aleatorias en las ecuaciones 29 y 30. Sin embargo, esta aleatoriedad está intrínsecamente ligada al momento de la fabricación de la fibra, lo que implica que estos parámetros son estáticos en el tiempo, siempre y cuando no haya cambios en el índice de refracción. En consecuencia, lo que realmente merece estudio es la variación del campo eléctrico, específicamente su fase. Se procede a generalizar las conclusiones anteriores para un modelo que represente de manera más precisa la fibra real.

Se asume un pulso con un largo D . A medida que este pulso se propaga por la fibra en un tiempo t , ilumina una cantidad $M = M(t)$ de centros de scattering. Sean r_i y z_i la reflectividad y posición, respectivamente, del i -ésimo centro de scattering. Por simplicidad se asume que dentro del pulso el efecto de la constante de atenuación α puede ser despreciado. En un instante concreto de tiempo, la medición del backscattering corresponderá a la suma de todos los campos generados por los centros de scattering iluminados por la mitad del pulso en el intervalo de tiempo $t = t_0 - T_{\text{trip}}$, donde $T_{\text{trip}} = L/V_p$ (la razón de esto se explica en la sección 2.4), tal y como se ha mencionado anteriormente en la sección 2.4. Es decir, el campo de backscattering en un tiempo t cualquiera viene dado por [61]:

$$E_{BS}(t) = E_0 e^{-2\alpha V_p t - j2\Phi_{\{0, M_s(t)\}}} \sum_{i=M_s(t)}^{M_e(t)} r_i \exp(-2j\Phi_{\{M_s(t), i\}}) \quad (34)$$

Analizando la ecuación 34: el término $M_s(t)$ corresponde al número de centro de scattering alcanzado por el inicio del pulso en un tiempo t . De forma similar, el término $M_e(t)$ es el número del último punto de scattering alcanzado por el pulso en el mismo instante. $\Phi_{\{k, p\}}$ representa un operador lineal que toma como parámetros el centro de scattering k y p , y corresponde a la integración de la constante de fase β desde z_k hasta z_p . Si consideramos que β mantiene un comportamiento homogéneo entre los centros de scattering, entonces se puede asumir que el término $\exp(-2j\Phi_{\{M_s(t), i\}})$ se calcula como: $\prod_{k=M_s(t)}^i \exp(-2j\beta_i(z_k - z_{k-1}))$.

Del análisis anterior, se concluye que el término $\exp(-j\Phi_{\{M_s(t), i\}})$ representa la fase acumulada desde el inicio del pulso hasta la posición del i -ésimo centro de scattering, donde dicha fase se obtiene de integrar la constante de fase β , por lo que la sumatoria completa representa la suma de todos los campos generados por los centros de scattering.

De esta ecuación también se puede extraer la siguiente conclusión: si ocurre un cambio en la fase en una posición cualquiera, ésta causará efectos sobre todos los campos que se encuentren en los puntos posteriores de la perturbación, esto debido a que el término $\Phi_{\{k, p\}}$ tiene “memoria espacial”.

Debido a las pequeñas variaciones en el índice de refracción, la propagación de la onda queda mayormente determinada por la variable aleatoria β_i , la cual tendrá un valor medio de $\bar{\beta}$ determinado por el valor promedio del índice de refracción efectivo \bar{n} . Si la fabricación de la fibra es suficientemente buena, podemos asumir que las variaciones del índice de refracción efectivo y β , son pequeñas, y por tanto despreciables, lo que hace que podamos tratar a la variable β_i como una variable determinista. Por último, gracias a la fórmula de Euler [56] la ecuación 34 puede ser escrita como:

$$E_{BS}(t) = E_0 e^{-2\alpha V_p t - j2\Phi_{\{0, M_s(t)\}}} \sum_{i=M_s(t)}^{M_e(t)} [r_i \sin(2\Phi_{\{M_s(t), i\}})j + r_i \cos(2\Phi_{\{M_s(t), i\}})] \quad (35)$$

Dado que podemos tratar Φ_{0i} como una variable determinista y que r_i es una variable aleatoria y gracias al teorema del límite central [70], podemos deducir que si la sumatoria de la ecuación 35 tiene suficientes términos entonces $E_{BS}(t)$ converge a una variable aleatoria gaussiana circular de media cero, por lo cual la magnitud del campo eléctrico tiene distribución Rayleigh y la fase tiene distribución uniforme entre $-\pi$ y π [57].

De todo lo anterior, se puede comprender el aporte que tiene la fase en el campo eléctrico, sin embargo, en un esquema Phase sensitive OTDR, al igual que en un sistema OTDR se mide la intensidad del campo eléctrico, de esta forma las trazas obtenidas corresponden a trazas de intensidad, como la observada en la figura 18. Debido a que las fases tienen un comportamiento aleatorio, esto produce que la intensidad también tenga ese comportamiento.

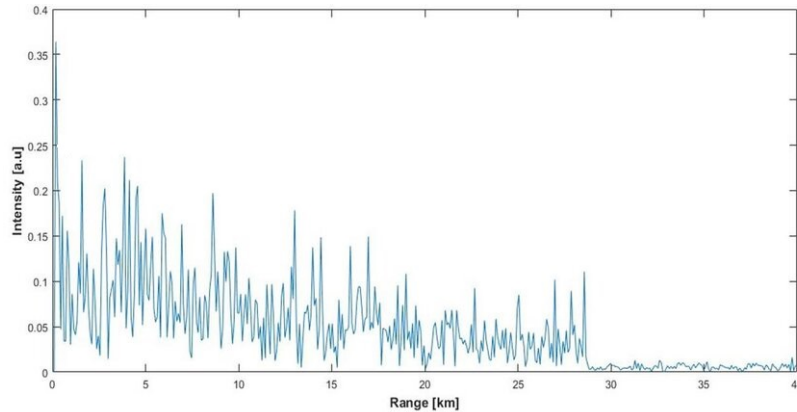


Figura 18: Traza típica de una medición con técnica Φ OTDR [42]

De la figura 18 se puede observar que la intensidad es efectivamente una variable aleatoria, por lo cual no es posible adquirir información directamente desde la amplitud del campo como en la técnica OTDR, en cambio la información se adquiere desde los cambios de fase del campo eléctrico.

2.5.2. Variación de fase

Hasta el momento se han abordado las consecuencias de la variación de fase e índice de refracción, sin embargo, aún no se ha explicado de manera exacta cómo se relacionan dichas variaciones con los fenómenos físicos que se busca medir. En esta sección, se profundizará sobre estos fenómenos físicos, para describir como éstos afectan a la fase de la onda de backscattering.

Cambios de temperatura: Los cambios de temperatura en la fibra óptica provocan diversas alteraciones en las propiedades propagativas y geométricas de la fibra. Principalmente, existen dos formas en las cuales los cambios de temperatura afectan a las propiedades de la fibra:

- *Efecto termo-óptico:* La velocidad de propagación en la fibra está directamente relacionada con la temperatura de las partículas que componen la fibra. La variación del índice de refracción se mide mediante un parámetro conocido como coeficiente termo-óptico γ_T , calculado como $\gamma_T = \partial n / \partial T$, donde T es la temperatura [43].
- *Efecto termo-mecánico:* Los materiales al calentarse o enfriarse experimentan cambios en su volumen, lo que afecta la propagación de la onda óptica, introduciendo cambios de fase al acortar o alargar la fibra. La longitud cambiante se mide a través del coeficiente de termoexpansión η_T , calculado como $\eta_T = 1/l \cdot \partial l / \partial T$ [44].

Finalmente, si hay una variación de temperatura ΔT , ésta generará un cambio de fase dado por [45]:

$$\Delta\Phi_T = 2\pi\gamma_T\Delta T V_0 l / c + 2\pi\bar{n}V_0\eta_T l \Delta T / c \quad (36)$$

Donde V_0 representa la frecuencia central del pulso incidente y l representa el tamaño del segmento perturbado. De esta forma, el término a la izquierda de la suma representa los cambios por efecto termo-óptico y el término de la derecha de la suma representa el cambio por efecto termo-mecánico[61].

Cambios por tensión (strain): Cambios en compresión y elongación, productos de fuerzas en la fibra causan, alteraciones en la distribución del material, lo que a su vez agrega cambios en las propiedades propagativas, introduciendo cambios en la fase de la fibra. La fase agregada a la fibra luego de aplicar una tensión ϵ sobre un segmento de longitud l se expresa como:

$$\Delta\Phi_\epsilon = 2\pi\bar{n}V_0 l / C \cdot (\xi\epsilon + \epsilon) \quad (37)$$

Donde V_0 representa la frecuencia central del pulso incidente y l representa el tamaño del segmento perturbado. Además $\xi = -1/2 \cdot n^2[(1 - \mu) \cdot p_{12} - \mu p_{11}]$, μ es el radio de Poisson y p_{11} y p_{12} son los coeficientes tenso-ópticos [46].

Vale la pena mencionar que el término correcto para este tipo perturbación es “strain“, palabra inglesa que no tiene una traducción directa al español, en este trabajo se decide utilizar la palabra “tensión“ en reemplazo. Sin embargo, para comprensión del lector puede ser más acertado pensar en ”elongación y compresión”.

Gracias a los resultados anteriores junto con las conclusiones de la sección 2.5.1, es posible detectar tanto cambios de temperatura como de tensión en la fibra, mediante cambios en la fase de las trazas phase sensitive OTDR.

No obstante, el uso de esta técnica tiene ciertas limitaciones debido a que el efecto de ambos fenómenos sobre la fibra se presenta únicamente a través de la fase, por lo que no es posible distinguir entre ambos fenómenos de forma independiente si ocurren a la vez. Sin embargo, existen formas de mitigar este problema. Es razonable suponer que el dominio de frecuencia de cambios de tensión y temperatura se encuentra lo suficientemente distante para poder distinguirlos mediante el uso de filtros. Siguiendo esta lógica, para recuperar los cambios de fase asociados a cambios de temperatura se debería utilizar filtros pasa-bajos, mientras que para detectar cambios de fase asociados a cambios de tensión se deberían emplear filtros pasa-altos o pasa-bandas. Las frecuencias de corte de ambos filtros quedan a criterio del diseño.

2.6. Adquisición e interpretación de trazas Phase Sensitive OTDR

Hasta el presente momento de este documento se han presentado las siguientes ideas:

- Se cuenta con modelos que pueden explicar los cambios en el campo eléctrico de backscattering.
- Una técnica para recuperar la intensidad de dichos campos
- Un modelo físico que establece la relación entre los cambios de fase del campo eléctrico y las variaciones ambientales

Sin embargo, aún no se ha presentado información sobre como obtener las variaciones de fase desde las trazas phase sensitive OTDR.

En términos generales, todas las metodologías utilizadas para recuperar las variaciones de fase del campo eléctrico se fundamentan en la **diferencia entre trazas**. Por lo tanto, siempre será necesario contar con una **traza de referencia inicial** [47]. Para mejorar la fidelidad de la medición, se recomienda que esta traza original se adquiera bajo condiciones ambientales conocidas.

Existen principalmente dos formas de obtener información ambiental. En la siguiente sección, exploraremos estos métodos junto con las complejidades y limitaciones asociadas a sus aplicaciones.

2.6.1. Detección basada en análisis de amplitud

La forma más sencilla de generar un DAS mediante la técnica Φ OTDR es mediante la resta directa de la intensidad de dos trazas tomadas en diferentes momentos. De la ecuación 34, se desprende que la aparición de un cambio de fase en un segmento de fibra ocasionará modificaciones en la **amplitud y fase** del campo eléctrico, generando así cambios en la intensidad del campo.

A pesar de que los cambios en la fase afectan a todos los campos subsecuentes, es posible demostrar que la intensidad solo variará dentro de la zona perturbada dada por la sumatoria de exponenciales complejas en la ecuación 34, fuera de ésta, no habrá variaciones. A continuación, se presenta un ejemplo de esta técnica para una variación de tensión a una distancia aproximada de 100 metros.

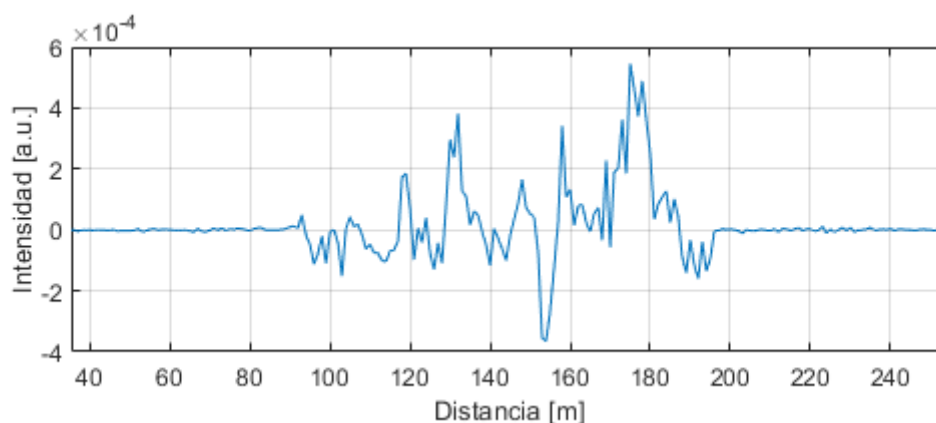


Figura 19: Sensor DVS mediante modificación de amplitud directa

De la figura 19 se pueden observar las dificultades de este método. Aunque existen variaciones dentro de la zona afectada, la magnitud de estos cambios estará dominada principalmente por la aleatoriedad de la sumatoria de coeficientes de reflexión de los centros de scattering, más que por el cambio de fase en si mismo. Por lo tanto, no es posible obtener información significativa sobre la magnitud de la variación de fase y por lo tanto, de la magnitud de variación de temperatura o strain.

Esta metodología específica se llama DVS (distributed vibration sensor) y debido a las características anteriormente mencionada, la utilización de esta técnica se encuentra limitada a aplicaciones en sectores como la seguridad, donde es crucial detectar variaciones sin necesidad de caracterizarlas en detalle.

A pesar de ser la metodología más simple para recuperar cambios en las trazas phase sensitive OTDR, ésta permite detectar posiciones y frecuencias de perturbaciones ambientales, en particular, variaciones acústicas, aún así, esta metodología tiene un alcance altamente limitado. Existen técnicas más complejas para DAS en base a la detección de cambios de fase, ofreciendo resultados mucho más precisos y completos.

2.6.2. Detección basada en análisis de fase

Como se ha mencionado anteriormente en la sección 2.5.1, los cambios de índice de refracción durante la propagación de la luz tienen efectos sobre la amplitud y la fase del campo eléctrico. Sin embargo, se puede obtener poca información desde la amplitud del campo eléctrico, como se demostró en la sección 2.6.1. Por esto se necesita encontrar formas de recuperar la fase o detectar cambios de fase. Es aquí donde esta la mayor ventaja de la técnica Phase Sensitive OTDR, la cual de hecho se concibió para ser utilizada mediante la recuperación de la fase del campo eléctrico.

De la ecuación 34, se desprende que la fase del campo eléctrico de backscattering está dada por:

$$\Phi(t) = \text{angle}(E_0) - 2\Phi_{\{0, M_s(t)\}} + \Lambda_{M_s(t)} \quad (38)$$

donde:

$$\Lambda_{M_s(t)} = \arctan \left(\frac{\sum_{i=N_s(t)}^{M_e(t)} r_i \sin(2\Phi_{\{M_s(t), i\}})}{\sum_{i=N_s(t)}^{M_e(t)} r_i \cos(2\Phi_{\{M_s(t), i\}})} \right) \quad (39)$$

De la ecuación 38, se obtiene que hay tres términos que dominan el valor del ángulo de la onda óptica de backscattering:

- $\text{angle}(E_0)$: Es la fase de la onda óptica emitida en el emisor.
- $2\Phi_{\{0, M_s(t)\}}$: Es el cambio de fase del pulso desde el emisor hasta el primer centro de scattering. Este término es linealmente dependiente de los cambios de fase y es principalmente debido a esto que se puede extraer información.
- $\Lambda_{M_s(t)}$: Es una variable aleatoria, que aparece debido a la propagación de los pulsos entre los centros de scattering, se produce una sumatoria de ángulos de comportamiento aleatorio por el efecto de los reflectores r_i .

Por lo que se tienen expresiones que pueden describir cambios de fase en la propagación de la fibra, sin embargo aún queda un desafío técnico por superar: la información adquirida desde un fotodetector corresponde a la intensidad y no al campo eléctrico, de manera que desde una medición directa no existe forma de extraer la fase del campo eléctrico, sino que en el mejor de los casos, su intensidad. En un intento por resolver este problema, se han explorado diversas técnicas para detectar la fase desde la intensidad

Para calcular las diferencias de fase, en general se requiere del uso de dos puntos en la traza. La distancia entre estos puntos suele ser fija, recibiendo el nombre de **gauge length**. Este parámetro determina una nueva resolución espacial.

A continuación, se revisará un concepto clave para la recuperación de fase, seguido por una breve exploración de las técnicas que permiten recuperar las fases desde las trazas de intensidad en sensores Phase Sensitive OTDR.

2.6.2.1. Desenvolvimiento de fase

Notemos que si existe una perturbación en la fase de la traza de backscattering mayor a 2π , entonces será imposible saber exactamente en cuánto varió la fase realmente. Esto debido a que la naturaleza cíclica de la fase acota los valores posibles de la misma entre $-\pi$ a π , generando entonces discontinuidades al exceder el rango previamente mencionado, a esta fase discontinua y acotada se le llama **fase envuelta**. Sin embargo, lo que se desea saber es el valor de la **fase absoluta**, es decir, el valor fuera del rango entre $-\pi$ a π .

La recuperación de la fase absoluta es un problema común en muchas áreas de la ciencia e ingeniería que requieren del estudio de cambios de fases. Por lo mismo, con el paso de los años se han desarrollado una serie de algoritmos que

tienen por objetivo recuperar la fase absoluta desde la fase envuelta. Dichos algoritmos se denominan **algoritmos de desenvolvimiento de fase**[47].

Es posible dividir estos algoritmos en 2 grandes grupos, desenvolvimiento temporal y espacial, los mismos toman como referencia puntos temporales o espaciales (respectivamente) para inferir el valor real de la fase absoluta [48]. El algoritmo a utilizar dependerá principalmente de la aplicación específica en que se utilizará. A la vez, el éxito que tengan los algoritmos dependen de una serie de condiciones, principalmente de la cantidad de puntos de muestreo que tenga la señal que se desea analizar.

Itoh en su trabajo describe de manera general y simple, un método de desenvolvimiento de fase consistente de 3 pasos resumidos [49]:

1. Formar diferencias sucesivas entre puntos adyacentes
2. Envolver dichas diferencias, es decir, reemplazar su valor con su modulo 2π para que se encuentre en el intervalo $[-\pi, \pi]$
3. Integrar la secuencia de diferencias envuelta resultante

Para que este método funcione, no deben haber cambios de fase mayores a π entre dos puntos, esto tiene tres consecuencias sobre sistemas phase sensitive OTDR [47]:

- La anterior restricción puede cumplirse para el desenvolvimiento temporal aumentando la frecuencia de muestreo lenta f_{st} . Sin embargo, como se revisó en la ecuación 24 esta frecuencia depende principalmente del largo de la fibra, lo que añade una limitante a la utilización de estos sistemas, siendo esta: el largo de la fibra debe tener dimensiones suficientes como para que los cambios en la misma puedan ser detectados lo suficientemente rápidos, evitando la falla de los algoritmos de desenvolvimiento.
- La restricción anterior puede cumplirse para el desenvolvimiento espacial aumentando la frecuencia de muestreo f_s , consiguiendo así tener puntos suficientes en la traza como para evitar fallas del desenvolvimiento, lo cual puede representar un aumento en los costos del equipo.
- La magnitud de las variaciones de fase y por tanto, de las perturbaciones deben ser acotadas para no superar la restricción mencionada.

Además de esto los algoritmos de desenvolvimiento de fase son altamente sensibles al ruido, por dos motivos principalmente, el primero y más evidente, es que si el ruido tiene una magnitud mayor a π , entonces incumple la restricción anteriormente mencionada, por otro lado, las variaciones aleatorias pueden ocasionar movimientos indeseados sobre las trazas desenvueltas.

En resumen la utilización de los algoritmos de desenvolvimiento es un tema crítico para poder determinar la variación real de la fase durante su propagación, para adquirir la fase absoluta de las trazas se debe utilizar algoritmos de desenvolvimiento, que son capaces de recuperar la fase absoluta desde la envuelta bajo ciertas restricciones de frecuencia de muestreo y amplitud de la variación.

2.6.2.2. Pulso Dual

La técnica de pulso dual consiste en enviar dos pulsos de distintas longitudes de onda, donde la diferencia temporal entre ambos define el *gauge length*. Aunque la disposición del sistema no difiere significativamente de la utilizada en un sistema OTDR clásico, esta técnica requiere de dos láseres de distintas longitudes de onda o un láser que pueda enviar más de una. La propuesta inicial de esta técnica fue presentada por Dakin y Lamb [50].

Como se explicó en las secciones 2.2 y 2.3, los reflectores en los centros de scattering dependen considerablemente de la longitud de onda de la luz incidente. Por lo tanto, al enviar dos pulsos, se obtendrán dos trazas de backscattering, cada una con características específicas de su longitud de onda. En el fotodetector, la intensidad combinada de ambas trazas de backscattering será equivalente, pero separada por una distancia determinada por el *gauge length* utilizado. Esto resulta en la siguiente expresión para la intensidad [47] :

$$I(t) = |E_{s1}|^2 + |E_{s2}|^2 + 2|E_{s1}||E_{s2}| + \exp \left[j \left(2\pi \left(|f_1 - f_2|t + \frac{2n\xi\delta l(t)}{\lambda} \right) + \Phi_1 - \Phi_2 \right) \right] \quad (40)$$

Donde E_{s1} y E_{s2} son la magnitud de los campos eléctricos emitidos; f_1 y f_2 , sus frecuencias.

La implementación del *gauge length* introduce los términos $\Phi_1 - \Phi_2$ y $f_1 - f_2$, estos dependen directamente de las fases de las trazas. Es gracias al análisis de este término que se pueden detectar cambios en las fases.

2.6.2.3. Recuperación de fase por interferencia

Otra técnica utilizada para recuperar la fase de las trazas es por medio del método de interferencia. En la figura 20 se puede ver una configuración típica para el uso de ésta técnica.

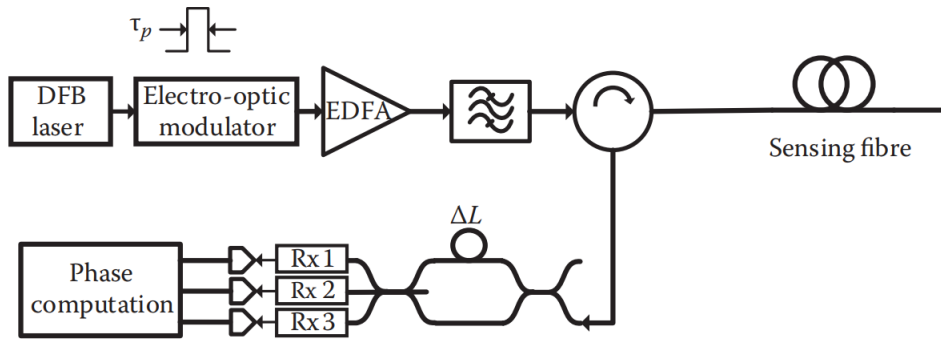


Figura 20: Configuración típica de sensado por interferencia [47]

A diferencia de la metodología de pulso dual, en esta técnica se envía un único pulso, el cual es duplicado después de pasar por el circulador. Una de estas réplicas se propaga por un camino más largo, con una distancia Δl elegida de manera que se produce una diferencia de fase $\Delta\Phi_l$, es esta diferencia añadida la que contiene información sobre las diferencias de fase.

La aplicación de esta técnica en sí misma conlleva ciertas complejidades, debido a que las mediciones únicas son ambiguas en el sentido de que no se puede saber información sobre perturbaciones de manera exacta, ese desafíos se aborda por medio de diferentes métodos, como el uso de acopladores para operar entre trazas de distintas maneras. Estos acopladores permiten realizar combinaciones lineales de campos propagados para recuperar información precisa sobre la fase. En la figura 20, se emplea un acoplador 3x3.

2.6.2.4. Detección heterodina

La detección heterodina presenta la característica de que la información de la fase no se extrae directamente del dominio óptico, es decir, de las diferencias de propagación de la luz en la fibra, si no que se extrae desde operaciones entre trazas. Ésta técnica se basa en el siguiente principio de funcionamiento: la onda óptica se envía desde el emisor, donde la luz se divide en dos caminos; en el primer camino, la luz se dirige a un Oscilador Óptico Local (OLO). Por otro lado, en el segundo camino, se realiza una modulación en amplitud y un cambio de frecuencia (frequency shift). Para este propósito, se recomienda el uso de un Modulador Acusto-Óptico (OAM). Los pulsos de backscatter se redirigen mediante un circulador hacia el OLO, y ambas señales se multiplican mediante un acoplador. Utilizando un sistema de sensado equilibrado y un filtro pasa banda se recupera la señal. Lo anterior se puede ver esquematizado en la figura 21

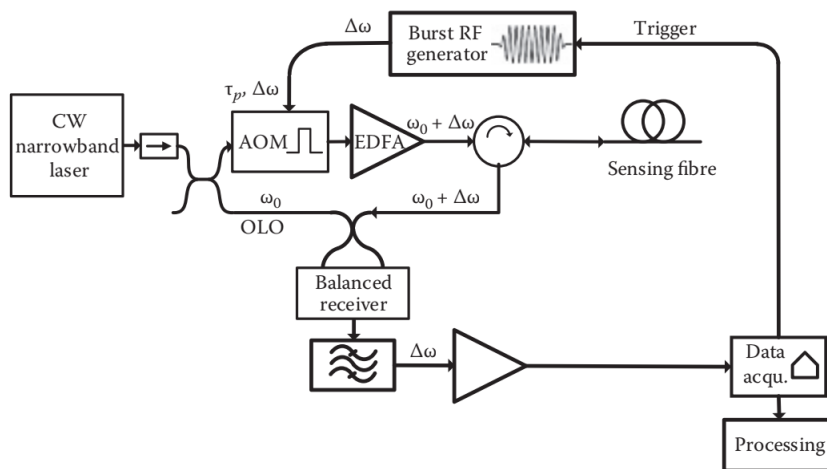


Figura 21: Esquema de funcionamiento de un sistema heterodino

En la figura 22 se puede observar una traza típica del método de recuperación heterodina. Se destaca cómo esta

traza toma la forma de un seno modulado. En este caso, la fase será la principal fuente de información y la amplitud se utilizará, en el mejor de los casos para determinar la relación Señal-Ruido (SNR). A partir de estas trazas, es posible adquirir finalmente la fase de la traza phase sensitive OTDR [47].

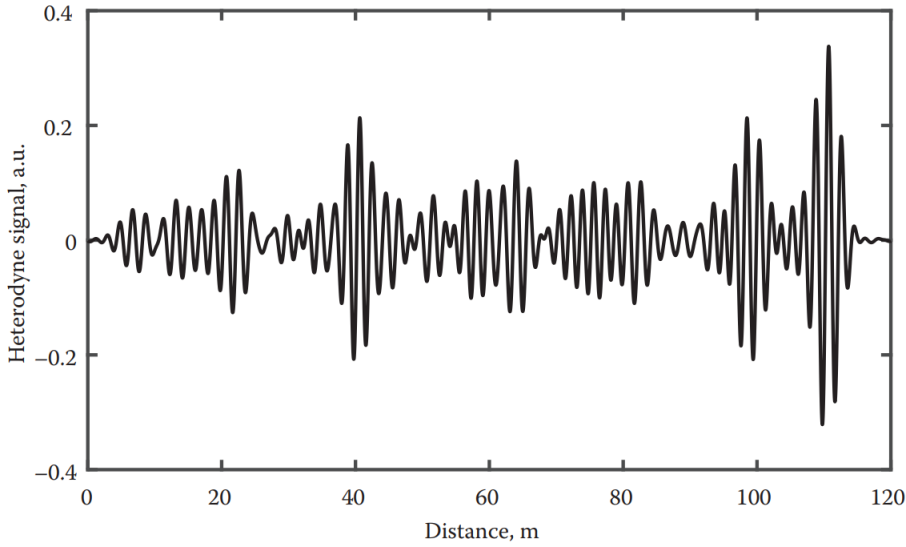


Figura 22: Traza de sensado heterodino [47]

2.6.2.5. Detección homodina

La detección homodina tiene una técnica similar a la heterodina, sin embargo en este caso la onda óptica emitida no pasa por un cambio de frecuencia (frequency shift), esto hace que existan retos adicionales a la hora de modular las señales, pues existirán ambigüedades respecto a la señal recuperada. Para salir de dichas ambigüedades es necesario aplicar técnicas de diversidad de fase, preferiblemente fases en cuadratura. El dispositivo que realizará esta tarea se llama híbrida 90° óptica.

En la figura 23 se puede observar la implementación de este sistema. A la entrada de la híbrida 90° óptica se conecta el OLO y la señal de backscattering en sus puertos respectivos, generando las señales en cuadratura correspondiente, esto permite que con una simple función arcotangente sea posible calcular la fase de la traza de backscattering.

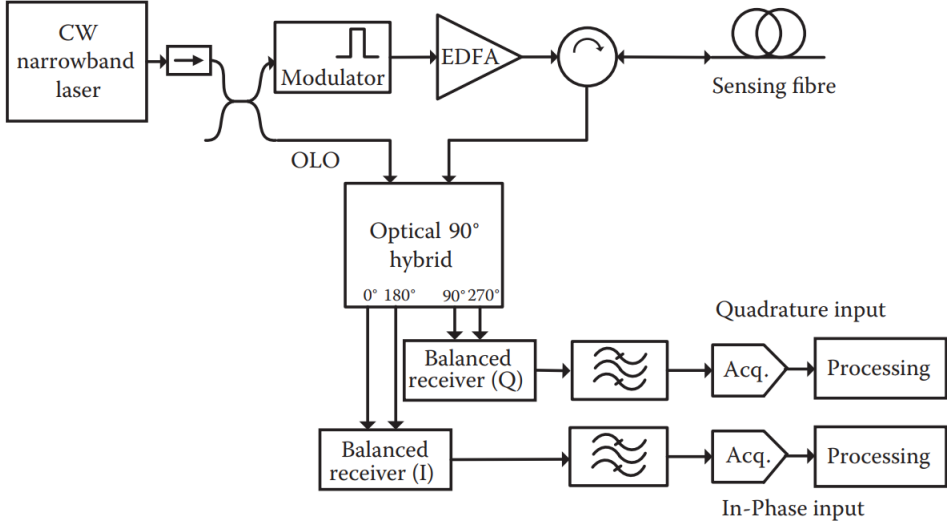


Figura 23: Configuración clásica de sensado homodino [47]

2.7. Resumen

Para concluir este capítulo es pertinente realizar un resumen integral de toda la información recopilada hasta el momento.

En primer lugar, la luz exhibe comportamientos de onda-partícula, por lo tanto, su propagación a través de una fibra óptica puede explicarse principalmente mediante dos mecanismos: la reflexión interna total y la resolución de las ecuaciones de Maxwell.

Cuando la luz propagada se encuentra una partícula cuyo tamaño es mucho menor que su longitud de onda, se produce la dispersión Rayleigh. Esta dispersión provoca que la luz se disperse siguiendo un patrón de radiación dipolar. Siendo la dispersión Rayleigh responsable de buena parte de la energía dispersada en la fibra óptica; dentro de esta dispersión, se distinguen dos ondas particulares: el forwardscattering y el backwardscattering.

A través de un esquema de medición sencillo, es posible obtener información valiosa desde la señal de backscattering, lo que permite adquirir datos sobre el estado y las pérdidas en la fibra.

Al emplear un emisor no coherente, podemos obtener información sobre las atenuación de la señal de backscattering. Por otro lado, al utilizar una señal altamente coherente, podemos adquirir información ambiental gracias a los cambios en la fase de la luz. Sin embargo, la obtención precisa de estos cambios de fase en la fibra presenta desafíos, ya que lo único medible directamente es la intensidad de la luz mediante un fotodetector. Esto hace necesario el uso de técnicas de adquisición y desenvolvimiento de fase.

Por último se examinaron diversas metodologías diseñadas para obtener información de fase o cambios en la fase.

3. Diseño e implementación del simulador

El empleo de tecnologías Phase Sensitive OTDR aún se encuentra en fase de estudio y solo recientemente se ha comenzado a incursionar en su uso en aplicaciones industriales fuera de entornos de laboratorio [62] y por lo tanto se continúan explorando formas de optimizar el uso de éstos sistemas en DAS y DTS.

Para realizar dichos estudios hace falta implementar arquitecturas como las discutidas en la sección 2.6, sin embargo esto puede resultar costoso y poco práctico para su uso en pruebas iterativas, por este motivo, la búsqueda de una solución más asequible, práctica y portátil se vuelve esencial. Aquí es donde se centra el objetivo de esta memoria: la creación de un sensor acústico distribuido en fibra óptica basado en reflectometría óptica en el dominio temporal.

El simulador se implementa en Matlab, haciendo uso de aproximaciones a la realidad para implementar un sistema adecuado y cercano a ésta.

El simulador desarrollado posee una serie de funciones que permiten generar simulaciones de manera sencilla y rigurosa. Entre las capacidades y características destacadas del simulador se encuentran:

- **Modularidad de componentes:** Es posible simular varias fibras y emisores, creando a partir de sus combinaciones todos los parámetros necesarios para la implementación simulada del sistema.
- **Propagación del campo eléctrico:** El sistema simula la propagación de un campo eléctrico a través de la fibra, teniendo en cuenta las condiciones propagativas de la fibra.
- **Generación de trazas Phase Sensitive OTDR:** El simulador es capaz de generar trazas Phase Sensitive OTDR, asemejándose de manera significativa a los resultados esperados en la realidad.
- **Sensor DAS y DTS:** El simulador puede captar las diferencias en la fase y transformar éstas en variaciones ambientales asociadas a los cambios en el entorno.

En el este capítulo, se realizará una revisión de los modelos empleados, un análisis detallado de todos los componentes utilizados en la simulación y, finalmente, se llevará a cabo la validación del funcionamiento de todos los sistemas internos del simulador.

3.1. Objetivos y función del simulador

El objetivo principal de esta memoria es crear un entorno que posibilite la simulación y obtención del campo eléctrico de backscattering, permitiendo la generación de trazas Phase Sensitive OTDR. Considerando el esquema presentado en la figura 12, los sistemas simulados incluyen la fuente, el pulso, la fibra bajo prueba, la onda de backscattering y un sistema de adquisición de datos. A continuación, se detallan los componentes simulados:

- **Fuente:** Se simuló un láser ideal de ancho espectral cero.
- **Pulso:** Se simuló el ancho temporal τ_D y el ancho espacial D del pulso.
- **Fibra bajo prueba:** Se simuló una fibra óptica, cuyas propiedades físicas fueron modeladas mediante variables aleatorias (variación en el índice de refracción) y deterministas (dimensiones, índices de refracción promedio, entre otros).
- **Backscattering:** Se generó un sistema capaz de producir trazas de backscattering asociadas a todos los parámetros anteriormente mencionados.
- **Simulación de demodulación de fase:** El sistema generado es capaz de analizar los campos de backscattering y, a partir de estos, obtener información sobre las variaciones de fase en el campo eléctrico. De esta forma, se pueden recuperar datos sobre perturbaciones ambientales.

Sobre estos componentes, es importante mencionar que el sistema de **demodulación de fase** diseñado realiza cálculos con el campo eléctrico de la onda de backscattering. No se está simulando un sistema de adquisición de datos por medio de la intensidad de la luz, como los estudiados en el capítulo 2.6. La justificación y consecuencia de esto es explicado en la sección 3.3.6.

3.2. Descripción general del simulador

El simulador se ha construido siguiendo los paradigmas de programación orientada a objetos y programación funcional². Por esto, se ha dividido el simulador en módulos que contienen únicamente la información y funciones pertinentes a su propio contexto.

²La programación orientada a objetos y la programación funcional son paradigmas que tienen como objetivos dar directrices generales sobre como estructurar y diseñar programas informáticos, a día de hoy su uso se considera estándar y necesarios en trabajos serios [65][66].

El simulador funciona mediante la interacción de los distintos módulos utilizando APIs³ personalizadas. Se han seguido convenciones comunes en informática, como el uso de propiedades, métodos, accesos privado, formato camel-case⁴, entre otras; esto para mantener el orden y la estructura del código [65][66][67].

De esta forma en la figura 24 se ilustra el diseño del simulador, basado en todos los principios de diseño mencionados:

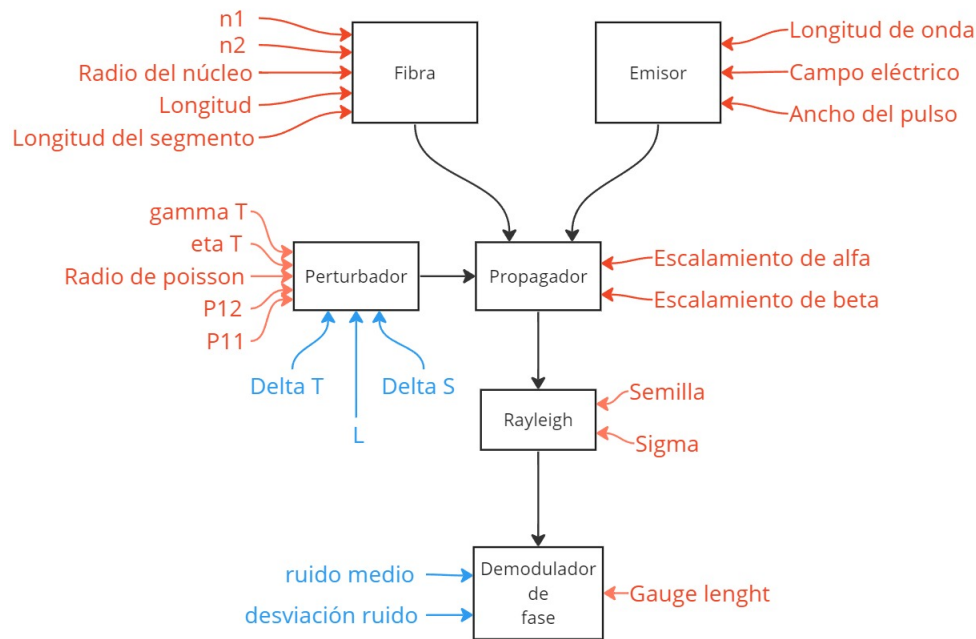


Figura 24: Diagrama de funcionamiento del simulador

La figura 24 presenta un diagrama que ilustra la comunicación entre los distintos módulos del simulador para generar trazas y simular sistemas DAS y DTS. Los recuadros representan los módulos, las flechas negras indican la comunicación entre los módulos, los parámetros de inicialización de los módulos se muestran en rojo y los parámetros que deben ingresarse después de la inicialización se indican en azul. Todos los módulos en el diagrama se implementaron como clases con propiedades y métodos.

De manera general, los distintos módulos del simulador son los siguientes:

- Fibra:** Implementada bajo la clase `classFiber`, con parámetros de entrada que incluyen el índice de refracción del núcleo y el revestimiento, el radio del núcleo, la longitud de la fibra y la longitud de los segmentos. Esta clase genera la fibra con la que se trabaja, representada por variables que contienen información relevante para calcular parámetros de propagación.
- Emisor:** Implementado bajo la clase `classTransmitter`, con parámetros de entrada que incluyen la longitud de onda la luz, la magnitud del campo eléctrico emitido y la duración del pulso τ_D . Esta clase almacena información relevante al emisor.
- Propagador:** Implementado mediante las clases `classPropagation` y `classPropagationSegment`, recibe como entrada los módulos de fibra, emisor y dos parámetros de escalamiento para la constante de atenuación α y la constante de fase β , estos últimos pueden ser utilizados para simulaciones específicas, como simular una fibra sin pérdida o con un coeficiente de propagación pequeño. El objetivo de este módulo es determinar todas las variables que definen las propiedades de propagación en la fibra óptica con el emisor específico ingresado, como los valores de la constante de fase β , frecuencia normalizada V , constante de fase normalizada b , etc. Para realizar estos cálculos, se hizo uso de modelos matemáticos y aproximaciones basados en la teoría de la propagación de ondas en la fibra óptica.
- Rayleigh:** Implementado bajo la clase `classRayleigh`, tiene como objetivo simular los campos eléctricos de backscattering. Recibe como parámetros de inicialización el módulo propagador, una semilla aleatoria y un valor de σ asociado a las variaciones del índice de refracción. Tiene acceso retroactivo a los módulos de fibra y emisor a través de la instancia del módulo propagador. Contiene todos los algoritmos necesarios para simular las trazas de backscattering, además de funciones o métodos útiles.

³Una API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) es un script, programa o bloque de código que se encarga de facilitar comunicaciones entre distintos componentes informáticos o entre componentes informáticos y un usuario [68].

⁴Camel-case es un convenio de notación que consiste en escribir frases separando las palabras por mayúsculas, por ejemplo, una función de nombre "calculadora de fase" se escribiría "calculadoraDeFase".

- Perturbador:** Implementado bajo la clase `classPerturbator`, recibe como parámetros de inicialización el coeficiente termo-óptico, el coeficiente termo-expansivo, el radio de Poisson y los coeficientes tenso-ópticos. Todos estos parámetros fueron revisados en la sección 2.5.2. Una vez inicializado el módulo, este puede recibir las variaciones de temperatura y tensión, generando los cambios asociados en el índice de refracción ingresando dichos cambios al módulo propagador.
- Demodulador de fase:** Implementado bajo la clase `classPhiOTDR`, recibe como parámetros de inicialización un *gauge length*. Después de su inicialización, es posible simular ruido en la medición ingresando el valor medio y la desviación del mismo. Se requiere de un módulo Rayleigh capaz de generar trazas para ser utilizado por el módulo DAS/DTS. El objetivo de este módulo es encontrar las variaciones de índice de refracción equivalentes producidas dentro de la fibra debido a las perturbaciones térmicas y acústicas, esto mediante a un análisis directo del campo eléctrico en las trazas Phase Sensitive OTDR. Gracias a la recuperación de la variación del índice de refracción efectivo y con algo de contexto adicional, es posible identificar las variaciones físicas que tuvieron lugar en la fibra óptica.

Además, para todo este trabajo, se discretiza la fibra óptica. En el simulador se siguió el siguiente esquema para las divisiones espaciales de la fibra:

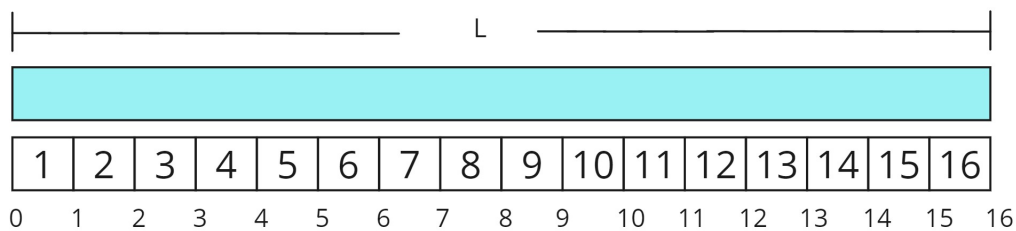


Figura 25: Segmentación de la fibra óptica en la simulación

En la Figura 25 se presenta la notación utilizada para la segmentación de la fibra. El área en tono celeste representa la fibra óptica de longitud L . En la parte inferior, en blanco, se visualizan los diversos segmentos en los cuales la fibra óptica es separada, estos segmentos representan un intervalo y están numerados de manera ascendente desde el primer hasta el n -ésimo término.

Por otro lado, en la zona inferior a los segmentos se pueden ver enumeradas las **posiciones discretas** p_i , que van desde cero hasta el n -ésimo término, éstas señalan los puntos donde parten y terminan los intervalos de los segmentos.

De forma que las distancias z pueden ser obtenidas a través de p_i simplemente como $z = p_i \cdot L_{\text{seg}}$, donde L_{seg} es el tamaño del segmento. En esta memoria es importante diferenciar entre las **posiciones discretas**, denotadas por la letra p , y las **distancias**, denotadas por la letra z o a veces d ; p hace referencia a las posiciones entre segmentos y se utilizará comúnmente cuando se discuta de algoritmos dentro de la simulación. Por otro lado, las distancias se utilizarán para explicar teoría o interpretar las simulaciones.

Por último, tal y como se explicó en la sección 2.5.2, las perturbaciones físicas producen variaciones de **fase**. En este trabajo, sin embargo, se adopta un enfoque basado en **variaciones en el índice de refracción**, de manera que dichas variaciones y fenómenos se condensan en variaciones del índice de refracción efectivo [54].

3.3. Descripción de componentes

En el desarrollo de un programa informático, es importante seguir paradigmas y técnicas que faciliten el trabajo y permitan realizar avances y mejoras de manera rápida y eficaz. Una de las herramientas más útiles en este sentido es la modularización, que consiste en la separación de los componentes de un código en sus partes más fundamentales con la intención de simplificar el proceso de desarrollo y la realización de mejoras en el futuro. La creación del simulador presentado en esta memoria no es una excepción.

En este capítulo, se proporciona una descripción detallada de los distintos módulos que conforman el simulador y que hacen que el simulador encaje en los paradigmas mencionados anteriormente.

3.3.1. Módulo fibra

La fibra es el objeto de estudio en cualquier sistema OTDR, ya sea phase sensitive o no, por lo cual es prudente que exista un módulo dedicado a esta entidad.

Este módulo almacena y calcula algunos parámetros fundamentales que permiten caracterizar una fibra óptica. No obstante, dentro de este módulo aún no se realizan cálculos sobre el backscattering. Esto puede parecer contradictorio,

ya que son las variaciones en el índice de refracción las que generan los centros de scattering, y estos son propios de la fibra óptica. Sin embargo, dado que varios parámetros relacionados con la propagación de la luz dependen principalmente de la longitud de onda de la luz, intentar realizar cálculos sobre el backscattering dentro de este módulo resulta contraproducente, pues las interacciones de backscattering no dependerán únicamente de la fibra, sino que de la interacción entre esta y otros módulos. Por lo tanto, se adopta un enfoque diferente, incluyendo dicha función en otros módulos.

En otras palabras, la operación de este módulo se limita al cálculo y almacenamiento de parámetros para que otros módulos puedan referenciar los valores calculados aquí.

Los parámetros para la inicialización de este módulo son:

- **n_1 y n_2 :** Los índices de refracción promedios del núcleo y revestimiento respectivamente, es decir, se ignoran las pequeñas variaciones producidas durante la fabricación, estos parámetros tienen efectos sobre las propiedades propagativas de la luz en la fibra óptica, afectando particularmente a la constante de fase y la frecuencia normalizada.
- **Radio del núcleo:** Este parámetro indica el radio del núcleo. Siempre se busca simular una fibra monomodo, por lo cual este parámetro es sumamente relevante para asegurar el funcionamiento en este régimen y calcular los límites de longitud de onda válidos para ser utilizados. El radio del núcleo tendrá efectos sobre las propiedades propagativas de la luz en la fibra óptica, afectando particularmente a la constante de fase y la frecuencia normalizada.
- **Longitud de la fibra:** Representa la longitud completa de la fibra óptica a estudiar.
- **Longitud del segmento de fibra:** Referida como L_{seg} . Simular la fibra de manera continua resulta imposible desde un punto de vista informático. De esto último nace la necesidad de dividir la fibra en segmentos. La longitud del segmento de fibra influye de manera importante en otros parámetros de la simulación, lo cual se analiza en la sección 3.5. Es discutible si el parámetro de longitud del segmento debería incluirse en otro módulo en lugar de este, ya que está más relacionado con otros parámetros de la simulación. La decisión de incluirlo en este módulo y no en otro, como el de propagación, es una decisión de diseño y puede cambiarse al implementar el simulador en un sistema diferente.

El proceso para la creación de una instancia⁵ del módulo fibra es como sigue:

1. Se almacenan los datos de n_1 , n_2 , y el radio del núcleo.
2. Se calcula la cantidad de segmentos que posee la fibra truncando la división entre las longitudes de la fibra y el segmento de fibra, y se almacena el valor de la cantidad de segmentos.
3. Se recalcula la longitud de la fibra como la multiplicación entre la longitud del segmento y la cantidad de segmentos, el valor de la longitud de la fibra se actualiza con el valor calculado.

Es importante notar que la longitud total de la fibra se modificará si la longitud de la fibra no es múltiplo de la longitud del segmento.

El resultado de esta operación es el almacenamiento de los parámetros fundamentales de una fibra, o una familia de fibras. Con esto, podemos caracterizar un tipo de fibra comercial, por ejemplo.

3.3.2. Módulo emisor

Los emisores utilizados clásicamente en sistemas de fibra óptica, sistemas OTDR y sistemas phase sensitive OTDR son dispositivos que funcionan mediante fenómenos físicos muy específicos, como se explica en la sección 2.1.

Para este sistema, se considera un láser de ancho espectral cero. Esto es físicamente imposible; sin embargo, debido a que los sistemas phase sensitive OTDR funcionan mediante emisores altamente coherentes, esta aproximación es acertada. Además, si se requiere la simulación de un espectro más ancho, podemos emplear el concepto de discretización mediante la suma de componentes de ancho cero. Esto significa que podemos representar un espectro continuo como la suma de una serie de componentes individuales, cada una de las cuales tiene un ancho infinitesimalmente pequeño. Esta aproximación nos permite manejar y analizar el espectro de manera más eficiente, ya que simplifica el proceso de cálculo y modelado.

En la figura 26, se puede observar un ejemplo de la discretización mencionada. En este caso, el espectro aproximado se conformaría de la suma de la cantidad de componentes deseados del espectro real. Cada uno de los componentes debería ser tratado como un emisor separado, lo que permite ajustar la magnitud e incluso el ancho del pulso producido en cada longitud de onda.

⁵La palabra "Instancia" se refiere a una entidad informática que se organización como una clase, en este caso, las clases son los módulos.

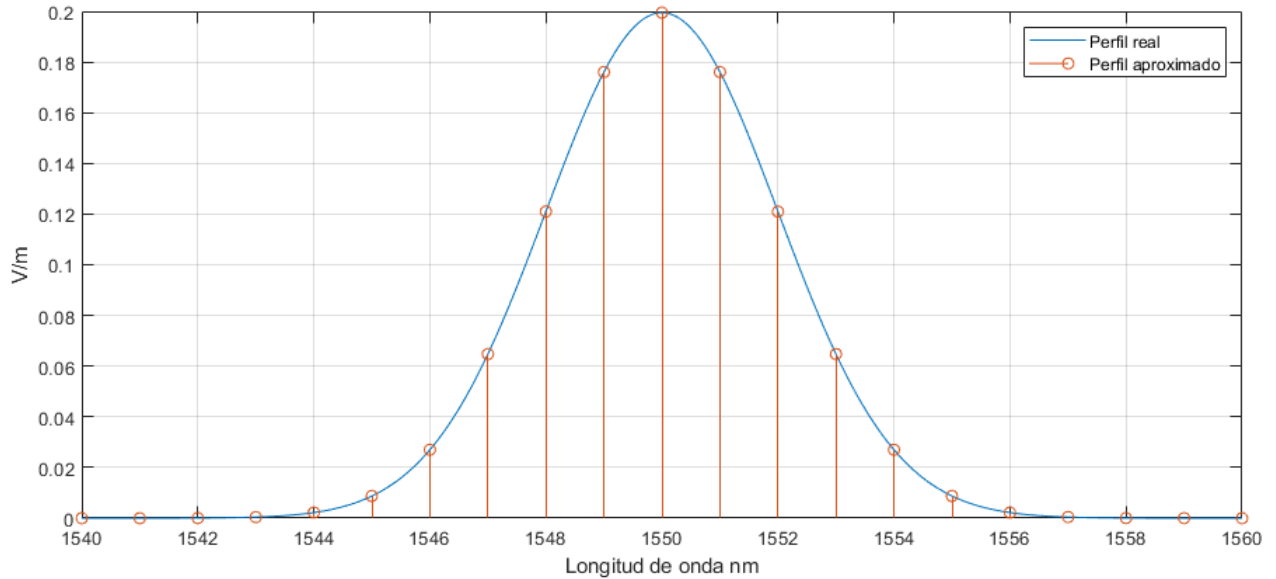


Figura 26: Perfil de longitud de onda real comparado con el perfil discretizado

Es importante notar que, dadas las condiciones de funcionamiento de un sistema phase sensitive OTDR, será raro necesitar un ancho espectral diferente de cero para una simulación, pues todos los sistemas phase sensitive OTDR funcionan con anchos espectrales muy pequeños.

Los parámetros de inicialización del módulo son:

- **Longitud de onda:** La longitud de onda en el vacío del emisor.
- **Campo emitido:** Es un número complejo que representa tanto la fase como la amplitud del campo eléctrico emitido.
- **Duración del pulso:** Los pulsos emitidos se caracterizan por su duración, generando un ancho temporal. Esta variable se encarga de almacenar dicha información.

El proceso para crear una instancia de la clase emisor es muy sencillo y consta únicamente de un paso: guardar los tres valores anteriores para ser utilizado por otros módulos.

El resultado final del proceso es un módulo que almacena la magnitud y frecuencia del campo eléctrico, así como la duración del pulso.

3.3.3. Módulo propagador

El módulo propagador opera como una interfaz de programación de aplicaciones (API) dentro del simulador, encargándose principalmente de transmitir información entre distintos módulos. En particular, recibe información de los módulos de fibra, emisor y perturbador para entregar información al módulo Rayleigh. La información calculada y procesada en este módulo corresponde a todos los datos de la propagación de una onda en una fibra óptica, además de datos útiles para servir de referencia en otros procesos.

Se utiliza un enfoque de segmentación. Inicialmente, se calculan los parámetros para toda la fibra; luego, algunos de estos parámetros se calculan para cada uno de los segmentos de la figura 25. Para este propósito, se crea otra clase que sirve para almacenar dichos parámetros de manera ordenada. Este es un sub-módulo llamado "Segmentos de propagación", implementado a través de la clase `classPropagationSegment`, existiendo tantas instancias de segmentos de propagación como segmentos de fibra.

Dentro del módulo propagador se incluyen funcionalidades útiles para facilitar su uso, como funciones para reiniciar el estado del arreglo de los segmentos de propagación y diversas funciones que realizan cálculos de propagación del campo eléctrico a través de la fibra óptica. Estos cálculos se realizan según las ecuaciones revisadas en la sección 2.1, lo que permite conocer la fase y amplitud del campo eléctrico en una posición específica de la fibra óptica.

Internamente, este módulo calcula varios parámetros, incluyendo la constante de fase normalizada b en función de la frecuencia normalizada V . Para esto, se realizó una aproximación polinómica utilizando la figura 7, en la cual se graficaron puntos del modo fundamental hasta alcanzar el valor de $V = 2,405$, y luego se aplicó un ajuste de curva polinomial de grado 4 para obtener una ecuación aproximada que permite calcular el valor de b en función de V :

$$b = -0,0574V^4 + 0,2544V^3 - 0,2309V^2 + 0,1001V - 0,0036 \quad (41)$$

Cabe destacar que el gráfico de la Figura 7 se construye bajo el supuesto de que existe una gran diferencia entre los valores de n_1 y n_2 . El efecto que tiene esta suposición sobre las curvas generadas se encuentra principalmente en los modos superiores, mientras que para el modo fundamental no hay grandes diferencias. Por lo tanto, la utilización de esta aproximación es válida, al menos como un primer acercamiento.

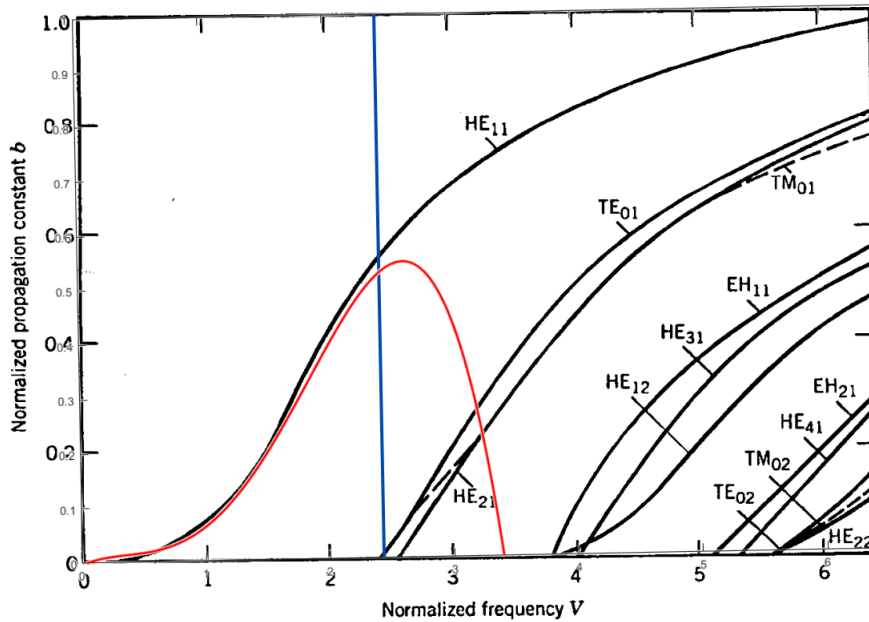


Figura 27: Aproximación para el cálculo de V , en rojo se puede ver la curva aproximada y en la recta azul se puede ver el límite de $V = 2,405$.

En la figura 27, se muestra la curva aproximada de b en rojo se ve la función de V aproximada, superpuesta con la curva original. Es posible notar que la aproximación es cercana a la realidad para valores de V menores a 2,405, lo cual no representa un problema ya que todo esta memoria opera bajo un régimen monomodo.

Otra aproximación utilizada considera que las pérdidas están dadas principalmente por la dispersión de Rayleigh. Aproximadamente, esta se expresa como [60] :

$$\alpha = \alpha_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \quad (42)$$

Donde:

- $\alpha_0 = 1,7 \text{ dB/Km}$
- $\lambda_0 = 0,85 \mu\text{m}$
- λ : Longitud de onda de la luz en el vacío.

Las pérdidas reales de una fibra óptica dependen de varias variables en su fabricación, sin embargo este valor aproximado sirve como un punto de referencia que puede ser ajustado gracias a el factor de escalamiento de α .

Se reconocen tres parámetros de entrada para este módulo: dos para la inicialización y uno para modificaciones de las propiedades de propagación.

Los parámetros de inicialización son aquellos con los cuales se calculan todos los parámetros de propagación fundamentales, por lo que el módulo de propagación estará ligado a estos parámetros de inicialización:

- **Fibra:** Es el módulo fibra con la cual se calculan las propiedades.
- **Emisor:** Es el módulo emisor que simula la onda de luz que se propagará por la fibra.
- **Factor de escalamiento para la constante de fase β y la constante de atenuación α :** Estos valores escalan los valores de β y α , para realizar pruebas específicas que requieran de esto.

El proceso que se sigue para la inicialización de esta instancia es el siguiente:

- Se almacenan los módulos fibra y emisor, vinculándolos permanentemente con la instancia del módulo de propagación.

- Según lo explicado en la sección 2.1.3, se calculan y almacenan los valores de la frecuencia normalizada V , la constante de fase normalizada b , el índice de refracción efectivo \bar{n} , la constante de fase β y la constante de atenuación α , los cuales se calculan según la ecuación 42. Estos dos últimos se combinan en la constante de propagación γ como $\alpha + j\beta$, donde j es la unidad imaginaria ($\sqrt{-1} = j$).

Luego, se calcula la velocidad de propagación $V_p = c/\bar{n}$ y el ancho del pulso espacial D como $\tau_d \cdot V_p$. Este ancho se expresa en función del número de segmentos de fibra que cubre, truncándose para coincidir con un número entero de segmentos de fibra. A este nuevo valor se le denomina D_{seg} . Se programa este último valor para tener una cota mínima de 2, asegurando que al calcular la resolución espacial de la traza OTDR, ésta sea un número entero de segmentos de fibra. En caso de que el ancho espacial del pulso sea menor a 2 segmentos se fija en 2 y se informa que los segmentos deberían ser más pequeños o el pulso más largo.

- Se inicializa un arreglo de N segmentos de propagación, donde N es el número de segmentos en la fibra. Dentro de cada elemento del arreglo se guardan copias de los valores de α y β , así como la integración de estos sobre el segmento. Suponiendo que α y β son constantes, dicha integración se calcula como $-\alpha \cdot L_{seg}$ y $-\beta \cdot L_{seg}$, respectivamente. Finalmente, se calcula la suma $-(\alpha + j\beta)L_{seg}$ y se almacena en una variable Γ . Esta es equivalente a la integración de γ en el segmento de fibra y, por lo tanto, contendrá información sobre la propagación del campo eléctrico sobre dicho segmento. Por último, se almacenará el valor de \bar{n} dentro de cada uno de los elementos del arreglo.

Al finalizar el proceso, se contará con un módulo que incluirá toda la información sobre la propagación de la luz en la fibra, además de una serie de utilidades para obtener información relevante.

Gracias al hecho de que existen copias de los parámetros de propagación en cada uno de los segmentos, estos pueden ser independizados. Esto será útil al agregar modificaciones de fase durante la propagación de los pulsos, ya que estos cambios se realizarán en referencia al arreglo de segmentos de propagación y no a los valores establecidos para el módulo de propagación completo.

Otra característica importante introducida en este módulo es la capacidad de propagar campos eléctricos a través de la fibra. Haciendo uso del arreglo de segmentos de propagación construido, se puede calcular la propagación del campo eléctrico por la fibra óptica como:

$$E_e = E_s \prod_{i=p_s+1}^{p_e} e^{\Gamma_i} \quad (43)$$

Donde:

- p_s y p_e son las posiciones discretas de inicio y termino de la propagación, respectivamente, según la notación de la figura 25.
- E_s es el campo incidente desde el punto inicial p_s .
- E_e es el campo resultante en la posición p_e .
- Γ_i es la integración de γ sobre el segmento i -ésimo

Esto se implementa dentro del código mediante un script iterativo que multiplica el valor del campo eléctrico inicial por los valores de e^{Γ_i} .

Por último, este módulo tiene una entrada que corresponde a la utilizada por el módulo perturbador. La interacción entre estos dos módulos se define por una función⁶ específica que permite ingresar una variación en el índice de refracción efectivo, un segmento inicial y un segmento final. Con la variación del índice de refracción ingresada, se calcularán las variaciones de β , y se integrarán dichas variaciones sobre los segmentos afectados. Finalmente, se actualizarán todos los valores propagativos asociados a los segmentos de fibra en los cuales hubo una variación del índice de refracción.

A la variación de β se le denota $\Delta\beta$, y a la variación de su integración se le denota $\Delta\Phi$.

Gracias a todo lo anterior, se dispone de un módulo que contiene toda la información referente a las propagaciones del campo eléctrico en la fibra, además de incluir las funcionalidades necesarias para realizar cambios en dichas propiedades para segmentos específicos de la fibra. Esto, en última instancia, permite un control preciso sobre el mecanismo de propagación y sobre la generación de las trazas phase-sensitive OTDR.

⁶Si se quiere ser completamente estricto, la palabra correcta en este contexto sería "método".

3.3.4. Módulo Rayleigh

El módulo Rayleigh se encarga de realizar todos los cálculos relacionados con el fenómeno de dispersión de Rayleigh, es decir, genera los campos eléctricos de backscattering que deberían ser captados por el módulo (módulo de el esquema OTDR, no módulo del simulador) de adquisición de datos. Este está vinculado a un módulo propagador, por lo que también está ligado a un único módulo de fibra y emisor.

Como se estudio en las secciones 2.3 y 2.5.1, la dispersión de Rayleigh es producida por variaciones del índice de refracción. Estas variaciones son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz, lo que implica que típicamente en una fibra óptica hay **miles de millones** de centros de scattering [64]. Tratar de simular todos estos centros de scattering representa una tarea computacionalmente exigente, una forma común de resolver este problema consiste en condensar el efecto de un grupo de reflectores, ejemplos de esta solución son los trabajos de Masoudi et al. [61] y X. Lu et al. [54].

En esta memoria se desarrolla el siguiente modelo basado en el principio anterior: cada segmento de fibra óptica se puede caracterizar por una función de transferencia. A partir de la ecuación 34, se puede calcular dicha función fijando el inicio de la fibra en el inicio del segmento, la posición inicial del pulso en el mismo punto y un ancho del pulso D suficiente como para cubrir el segmento completo:

$$h = \sum_{i=M_s(z_{\text{init}})}^{M_e(z_{\text{end}})} r_i \exp(-2j\Phi_{\{M_s(z_{\text{init}}), i\}}) \quad (44)$$

Donde z_{init} y z_{end} son las posiciones de inicio y final del segmento, respectivamente, de está forma $L_{\text{seg}} = z_{\text{end}} - z_{\text{init}}$. $M_s(z)$ es una función similar a la descrita en la sección 2.5.1, con la diferencia de que tiene dependencia espacial en lugar de temporal, es decir, esta función representa el primer centro de scattering en el segmento de fibra óptica. Por otro lado, $M_e(z)$ representa el último centro de scattering en el segmento de fibra óptica. A la función de transferencia de la ecuación 44 se llama "reflector acumulado" y se denotó con la letra R .

Según lo estudiado en la sección 2.5.1 y particularmente en la ecuación 35, el reflector acumulado R sigue una distribución gaussiana circular con media cero y desviación estándar determinada por las propiedades del emisor y la fibra, esto debido al teorema del limite central [70]. De esta forma cada segmento de fibra está caracterizado por un reflector acumulado R . El cuadro 1 muestra una comparativa entre el reflector individual r (que caracteriza el centro de scattering) y el reflector acumulado R .

	Reflector individual r	Reflector acumulado R
Describe	Centro de scattering	Segmento de fibra óptica
Distribución	Variable	Gaussiana circular
Dominio	Real	Complejo
Intervalo	Entre 0 y 1	Todo el dominio complejo

Cuadro 1: Comparativa entre r y R

De está forma el campo eléctrico de backscattering generado por un campo eléctrico incidente a un segmento de fibra óptica viene dado por:

$$E_{BS\text{seg}} = E_{i\text{seg}} \cdot R \quad (45)$$

Donde, $E_{BS\text{seg}}$ representa el campo eléctrico de backscattering al inicio del segmento, $E_{i\text{seg}}$ representa el campo incidente al segmento y R es el reflector acumulado del segmento de fibra óptica.

En un sistema de fibra óptica real, la traza de backscattering se genera midiendo el campo eléctrico de backscattering que llega al módulo de adquisición de datos. Estas mediciones se realizan a una frecuencia de muestreo f_s , y por lo tanto, cada medición se asocia a un tiempo t . De acuerdo a lo estudiado en la sección 2.4, cada medición está asociada a un intervalo de distancia desde $V_p t/2$ hasta $V_p t/2 + W$, donde W es la resolución espacial y está dada por $D/2$, donde D es el ancho espacial del pulso.

Considerando la ecuación 11, que describe el campo eléctrico de backscattering en el inicio de la fibra en función del tiempo, se define el campo eléctrico de backscattering E_{BS} en el inicio de la fibra en función de una posición discreta p .

$$E_{BS}(p) = E_0 e^{2\sum_{k=0}^p \Gamma_k} \sum_{i=p}^{p+D_{\text{seg}}/2} R_i e^{2\sum_{k=p}^i \Gamma_k} \quad (46)$$

Donde D_{seg} y Γ_k representan el ancho espacial del pulso en segmentos y la integración de γ sobre el i -ésimo segmento, respectivamente. Ambos están definidos en la sección 3.3.3.

Como se muestra en la ecuación 46, las propiedades de propagación se utilizan durante el cálculo, por medio de la variable Γ_k . Esto significa que cuando ocurre algún cambio dentro de esta última, dicho cambio se ve reflejado en

el campo eléctrico calculado. Esto es lo que finalmente habilita la capacidad de ingresar perturbaciones asociadas a cambios ambientales.

En esta memoria, la traza de backscattering se construye en función de la distancia y no en función del tiempo, dicha construcción es llevada a cabo por el módulo Rayleigh.

Para explicar el algoritmo de generación de la traza phase sensitive OTDR que lleva a cabo el módulo Rayleigh, se utiliza como ejemplo una fibra óptica de 16 segmentos, como la ilustrada en la figura 28. Esta fibra tiene una cantidad reducida de segmentos para simplificar la explicación.

En la figura 28, los números dentro de los recuadros representan el número de segmento, mientras que los números por debajo de los recuadros (que son los segmentos) representan las posiciones discretas.

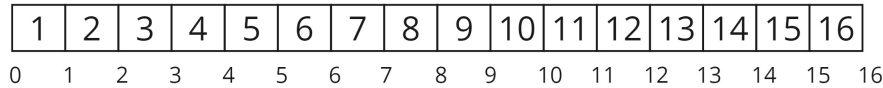


Figura 28: Fibra óptica utilizada para la explicación del algoritmo de generación de la traza de backscattering

De esta forma, el algoritmo para la generación de la traza de backscattering es el siguiente:

1. Se calcula la propagación del campo eléctrico emitido desde la posición discreta 0 hasta la última (en este caso, la 16), esto se logra mediante la ecuación 43 que describe la propagación del campo eléctrico a través de los segmentos de fibra óptica. Este proceso se ilustra en la figura 29.

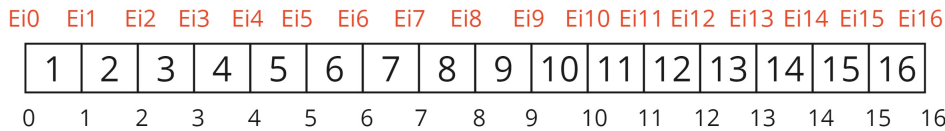


Figura 29: Primer paso del algoritmo para la generación del campo eléctrico

En la figura 29 se puede ver el campo incidente propagado en letras rojas sobre los segmentos, representado como E_{ik} , donde k representa el segmento al cual incide el campo eléctrico. Por ejemplo, el campo eléctrico E_{i3} representa el campo propagado desde la posición discreta 0 hasta la posición discreta 3.

Estos campos calculados serán utilizados en los pasos siguientes.

2. Se fija una variable $p = 0$ que representa la posición de inicio del pulso mientras este se propaga.
3. Se calcula el campo eléctrico de backscattering producido por los segmentos desde el $p + 1$ hasta $p + W_{seg}$, donde W_{seg} se calcula como $D_{seg}/2$ y representa la resolución espacial en número de segmentos.

El campo eléctrico de backscattering en la k -ésima posición discreta se calcula como:

$$EB_k = E_{ik} \cdot R_{k+1} \tag{47}$$

Donde EB_k es el k -ésimo campo eléctrico de backscattering generado, E_{iK} es el campo eléctrico calculado en el paso 1 incidente al k -ésimo segmento y R_{k+1} es el reflector acumulado que genera el backscattering.

En la figura 30 se puede ver una representación visual de este paso, para un valor de $p = 2$ y un ancho del pulso espacial D_{seg} de 6 segmentos. En azul se representa el campo eléctrico de backscattering y dentro de los segmentos se representa el reflector acumulado; la posición discreta en verde y en negrita representa el valor actual de p .

En naranja se identifican los segmentos de fibra óptica que generan los campos de backscattering que llegarán al mismo tiempo al inicio de la fibra⁷, mientras que en amarillo pálido se identifican los segmentos que se encuentran iluminados, pero cuyos campos eléctricos generados no llegarán al mismo tiempo que los campos generados por los segmentos en naranja. La razón por la que sucede esto se explica en el estudio de la resolución espacial presentado en la sección 2.4.

⁷Los pasos del algoritmo **no representan instantes temporales**, por lo tanto, los campos eléctricos de backscattering en azul **no** fueron generados al mismo tiempo. Para más detalles, revisar la explicación de resolución espacial presentada en la sección 2.4.

Es decir, los segmentos en naranja representan el intervalo de distancia que identifica la medición del campo eléctrico de backscattering, o en otras palabras, la resolución espacial W .

Mientras que los segmentos en amarillo pálido más los naranja representan los segmentos iluminados por el pulso propagado.

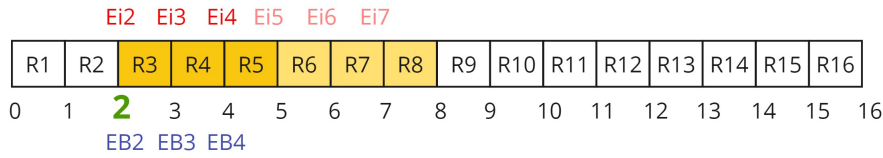


Figura 30: Segundo paso del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico

- Haciendo uso de la ecuación 43, se calcula la propagación de los campos eléctricos de backscattering calculados en el punto 3 desde sus posiciones discretas de origen hasta el inicio de la fibra, es decir, hasta la posición discreta 0. Finalmente, los campos eléctricos propagados se suman.

Una representación de este paso se ilustra en la figura 31. En esta figura, las flechas indican la posición a la que se propagan los campos eléctricos de backscattering.

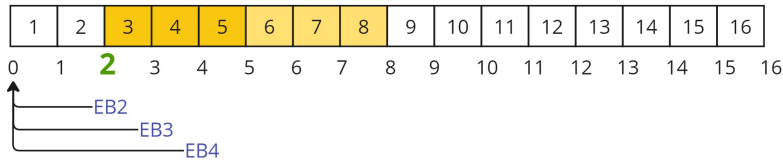


Figura 31: Tercer paso del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico

El valor de la suma de los campos de backscattering propagados representa la medición número $p + 1$, que identifica desde la posición discreta p hasta la posición discreta $p + D_{seg}$.

- Se le suma 1 a la variable p del paso 2, esto representa que el pulso propagado avanza 1 segmento. En este punto se pueden dar 2 situaciones, si el valor de $p + W_{seg}$ es menor o igual al número de segmentos (o a la última posición discreta), se regresa al paso 3, pues el pulso debe de terminar de propagarse. Esta situación se puede ver ilustrada en la figura 32, en la cual el valor de p anterior era 2 y, por lo tanto, al sumarse 1 en este paso, pasa a ser 3.

En caso contrario, se va al paso 6, pues el pulso alcanzó el final de la fibra. Esta situación se puede ver ilustrada en la figura 33, en la cual el valor de p anterior era 13 y, por lo tanto, al sumarse 1 en este paso, pasa a ser 14.

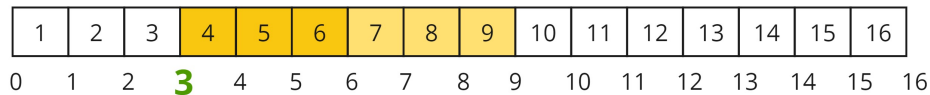


Figura 32: Condición de continuidad del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico de backscattering

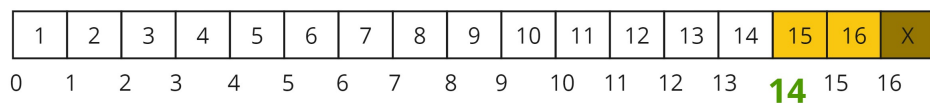


Figura 33: Condición de termino del algoritmo para la generación de la traza de campo eléctrico de backscattering

- Se ha calculado la traza de backscattering, y se tiene un arreglo de datos que representan las distintas mediciones del campo eléctrico.

El algoritmo anterior tiene dos ciclos anidados: uno correspondiente a la cantidad de segmentos de la fibra (pasos 3 al 5) y el otro dado por la cantidad de segmentos que cubren la mitad del pulso (pasos 3 y 4). Por este motivo, el tiempo de ejecución T_{exec} del algoritmo es proporcional a:

$$T_{exec} \sim (N \cdot D_{seg}/2) = \left(\frac{L}{L_{seg}} \cdot \frac{V_p \cdot \tau_d}{2L_{seg}} \right) \quad (48)$$

Donde N representa el número de segmentos en la fibra óptica y D_{seg} indica el ancho del pulso en número de segmentos. Esto implica que el tiempo de ejecución del algoritmo aumenta de manera lineal con la longitud de la fibra, el ancho temporal del pulso y la velocidad de propagación; por ende, en última instancia, son las propiedades del emisor y de la fibra las que determinan en gran medida el tiempo de ejecución de la simulación. Sin embargo, el tiempo de ejecución también está influenciada por el inverso del cuadrado de la longitud de los segmentos (L_{seg}). Utilizar segmentos de mayor tamaño puede ayudar a contrarrestar el efecto de la longitud de la fibra y de las propiedades de propagación. Sin embargo, el tamaño del segmento también puede aumentar considerablemente el tiempo de ejecución si se fija L_{seg} en un tamaño pequeño.

En la figura 34 se observa un diagrama de la lógica de la generación de la traza de backscattering. En verde se pueden observar la suma de los distintos campos eléctricos de backscattering que serán detectados al mismo tiempo y en amarillo se pueden observar el conjunto de segmentos que producen dicho backscattering, en el ejemplo de la figura 34 la traza se formaría de los campos de backscattering en verde propagados hasta el inicio de la fibra.

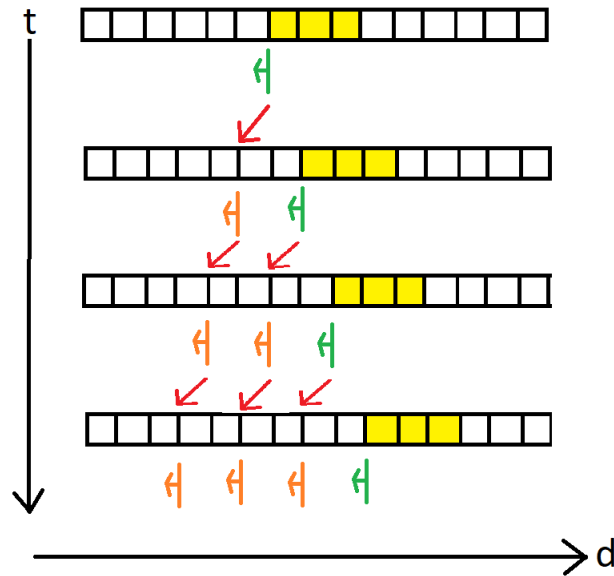


Figura 34: Diagrama de la generación de la traza, en amarillo se observa los segmentos que producen la onda de backscattering, en verde se puede ver la onda de backscattering recién generadas, las flechas rojas representan el movimiento de la onda de backscattering y en naranja se observan las ondas de backscattering propagadas

Se observa que, según el algoritmo de generación de la traza, cada punto de la traza se captura en el tiempo que la luz recorre dos segmentos de fibra óptica. Además, cada punto de la traza tendrá una separación entre ellas de una distancia determinada por V_p/f_s , donde V_p representa la velocidad de propagación de la luz y f_s la frecuencia de muestreo del m. Debido a la implementación del sistema, la separación mínima entre puntos está determinada por el tamaño de los segmentos de fibra óptica. Por lo tanto, se puede deducir que estos están directamente relacionados con la frecuencia de muestreo f_s . En consecuencia, la frecuencia de muestreo máxima f_{smax} implementable está dada por:

$$f_{smax} = \frac{V_p}{2L_{seg}} \quad (49)$$

De esta forma, si se quiere utilizar una frecuencia de muestreo menor se ha de realizar un sub-muestreo seleccionando elementos intercalados de la traza a máxima frecuencia, por lo tanto, las frecuencias de muestreo implementables f_s están dadas por:

$$f_s = \frac{V_p}{2L_{seg}m} \quad (50)$$

Donde m es un número natural que representa posibles sub-muestras de la traza. En principio, parecería que el tamaño del segmento debería asociarse directamente con un parámetro de frecuencia de muestreo en lugar de al revés. Se tomó la decisión de implementarlo de esta forma principalmente porque para aproximar los centros de scattering se requiere que el reflector acumulado sea lo suficientemente pequeño (esto se discute a profundidad en las secciones 3.3.5 y 3.5). Por lo tanto, para asegurar esta condición, tiene más sentido construir los segmentos de manera independiente a la frecuencia de muestreo y poner restricciones sobre esta última.

Considerando que se muestrean los campos eléctricos que estén **completamente fuera del emisor** hasta que el pulso alcance **el final de la fibra**, la cantidad de puntos de la traza P_{traza} , a la máxima frecuencia de muestreo posible, está dada por:

$$P_{\text{traza}} = N - \frac{D_{\text{seg}}}{2} + 1 \quad (51)$$

Donde N es la cantidad de segmentos en la fibra.

Para inicializar el módulo Rayleigh se requiere un módulo de propagación para utilizar las variables de propagación de la fibra, la propia fibra y el emisor. Además de esto, se necesita un valor para la semilla aleatoria⁸ y la desviación estándar de los reflectores acumulados R . El proceso de inicialización de la clase consiste en:

1. Almacenar el módulo de propagación.
2. Almacenar la desviación estándar y la semilla aleatoria.
3. Calcular y almacenar la frecuencia de muestreo máxima.
4. Generar un arreglo de datos con tantos elementos como segmentos tenga la fibra. En cada uno de los elementos del arreglo, se generan dos números aleatorios siguiendo una distribución gaussiana con media cero y desviación estándar igual a la ingresada en la inicialización, uno de los números corresponde a la magnitud de la parte real y el otro a la magnitud de la parte imaginaria, formando así el arreglo de números complejos que representan los reflectores acumulados R .

Al finalizar este proceso, se tendrá un módulo listo para generar trazas phase sensitive OTDR.

El módulo generado es capaz de realizar todas las tareas descritas anteriormente, además de incluir diversas funciones que facilitan la utilización del módulo.

Este módulo es el núcleo del trabajo y es donde se ejecutan la mayor cantidad de cálculos. Si eventualmente se quisiera tomar un enfoque diferente en la forma de simular los reflectores u otro mecanismo de generación de trazas de backscattering, éste es el módulo a modificar.

En resumen, se dispone de un módulo altamente escalable con las capacidades necesarias para generar trazas Phase sensitive OTDR, y para introducir cambios en ellas.

3.3.5. Módulo perturbador

El módulo perturbador actúa como interfaz entre el usuario y el simulador. Su objetivo es transformar las variaciones de tensión y temperatura en cambios del índice de refracción efectivo para que estos puedan influir en el módulo propagador.

En esta memoria, se considera que las perturbaciones tienen la misma magnitud en cada segmento de fibra óptica (no confundir con la longitud total de la fibra óptica). Así, de la ecuación 44, considerando que el índice de refracción es homogéneo entre centros de scattering, se observa el efecto que tendrá una variación de fase $\Delta\Phi$ en el reflector acumulado R . Por simplicidad, se considera que la distancia entre centros de scattering es homogénea en toda la fibra óptica y tiene un valor de L_{sca} .

$$R' = \sum_{i=M_s(z_{\text{init}})}^{M_e(z_{\text{end}})} r_i \exp(-2j(\sum_{k=M_s(z_{\text{init}})}^i \beta L_{\text{sca}}(k - M_s(z_{\text{init}})) + \Delta\Phi)) \quad (52)$$

En donde R' representa el reflector acumulado después de la variación de fase $\Delta\Phi$, y β es la constante de fase de la fibra óptica.

En la ecuación 52, se observa que el término $\Delta\Phi$ se encuentra dentro de una sumatoria. Dicha sumatoria está incluida en una función exponencial, la cual, a su vez, está dentro de otra sumatoria que incluye el reflector individual del centro de scattering i -ésimo, como se ha estudiado previamente, r_i es una variable aleatoria.

Entonces, el reflector acumulado después de la variación de fase R' tendrá una distribución gaussiana circular de media cero. Esto se debe a que el teorema del límite central sigue siendo válido para la ecuación 52, ya que la variación

⁸La semilla aleatoria es un valor arbitrario que utilizan los sistemas informáticos para generar resultados aleatorios, si en dos procesos aleatorios de idénticas propiedades se utiliza la misma semilla aleatoria se obtendrán los mismos resultados.

de fase $\Delta\Phi$ no es una función aleatoria que altere la independencia de r_i [54][70]. Pero, la desviación estándar de R' es diferente a la del reflector acumulado antes de la variación de fase R .

Sin embargo, si el tamaño del segmento de fibra óptica L_{seg} y/o la magnitud de la perturbación son lo suficientemente pequeñas, entonces la variación de fase $\Delta\Phi$ puede ser despreciada en la ecuación 52. Como se discutió en el capítulo 2.5.2, la variación de fase producida por las perturbaciones depende linealmente de la magnitud de la perturbación térmica o tensorial y de la longitud de la misma.

Entonces, si se cumple la condición anterior, el reflector acumulado después de la variación de fase R' será aproximadamente igual al reflector acumulado R . En otras palabras, el reflector acumulado, aproximadamente, no cambia ante variaciones de fase.

Es decir, es posible despreciar la variación de fase entre centros de scattering dentro de un segmento de fibra, pero no la variación de fase entre segmentos de fibra óptica.

Esto añade importancia al parámetro de la longitud del segmento de fibra óptica L_{seg} , pues es necesario que esta sea lo suficientemente pequeña como para que la premisa anterior sea correcta. Mientras mayor sea el tamaño del segmento de fibra, menos realista será la simulación. Cabe destacar que esto no aplica para la traza sin perturbación; la diferencia con un sistema físico real surgirá al aplicar una diferencia de fase sobre la fibra. Por lo tanto, la obtención de trazas estáticas se mantendrá válida independientemente del largo del segmento de fibra.

Lo discutido anteriormente no es aplicable para la ecuación 46, la cual describe el campo eléctrico de backscattering producido por segmentos de fibra óptica. Las perturbaciones a esa escala deben ser consideradas.

De todo lo anterior se concluye que se consideran únicamente los efectos de la variación de fase en los segmentos de fibra óptica completos. Esto se logra mediante la introducción de las variaciones de fase $\Delta\Phi$ en la integración de la constante de propagación γ sobre el segmento de fibra. Esta acción es equivalente a modificar la variable Γ asociada a cada segmento de fibra, la cual fue definida en la sección 3.3.3.

Siguiendo un enfoque de **variación del índice de refracción**, para introducir la variación de fase es necesario calcular una equivalencia entre variación de fase y variación de índice de refracción. A partir de las ecuaciones 36 y 37, es posible definir las variaciones del índice de refracción equivalentes a las variaciones de fase debido a cambios de temperatura y tensión, las cuales se expresan como [54]:

■ **Temperatura**

$$\Delta n_T = (\gamma_T + \bar{n}\eta_T)\Delta T \quad (53)$$

Donde Δn_T es la variación de índice de refracción asociado a perturbaciones térmicas, γ_T es el coeficiente termo-óptico, η_T es el coeficiente de termoexpansión, \bar{n} es el índice de refracción efectivo y ΔT es la variación termina en grados kelvin.

■ **Tensión**

$$\Delta n_\epsilon = \bar{n}(\xi + 1)\epsilon \quad (54)$$

Donde Δn_ϵ es la variación de índice de refracción asociado a perturbaciones tensoriales, $\xi = -1/2 \cdot \bar{n}^2[(1 - \mu) \cdot p_{12} - \mu p_{11}]$, μ es el radio de Poisson y p_{11} y p_{12} son los coeficientes tenso-ópticos [46], \bar{n} es el índice de refracción efectivo y ϵ es la variación de tensión (strain) en ϵ .

De esta manera, es posible transformar las variaciones de temperatura y tensión en variaciones del índice de refracción. Como se estudió en la sección 3.3.3, el módulo propagador cuenta con las funciones necesarias para recibir estos datos y, a partir de ellos, realizar todos los cálculos y cambios en los segmentos de propagación.

Éste módulo cuenta con 6 parámetros para su inicialización, 5 de los cuales son los coeficientes termo-ópticos y tenso-ópticos para el cálculo de las variaciones de fase en la propagación (descritas en la sección 2.5.2):

- Coeficiente de termoexpansión η_T .
- Coeficiente termo-óptico γ_T .
- El radio de poisson μ .
- coeficientes tenso-ópticos p_{12} y p_{11}

El sexto parámetro es el módulo propagador el cual será modificado. El proceso de inicialización consta únicamente del almacenamiento de todas las variables.

Además de esto, existen parámetros de entrada que se ingresan después de inicializado el módulo. Estos parámetros incluyen las variaciones de temperatura o tensión en la fibra óptica y las posiciones entre las cuales ocurren dichas variaciones. Cuando se reciben estas variables, se calcula la variación del índice de refracción según las ecuaciones 53 y 54, y por último se transmiten mediante las funciones diseñadas en el módulo propagador. Este último modificará los parámetros correspondientes a la variación en los segmentos de propagación, es decir, se modifica el índice de refracción efectivo, el coeficiente de fase, el coeficiente de atenuación, el coeficiente de propagación, la integración de las variables, etc.

Finalmente, se tiene un módulo capaz de interactuar con el módulo de propagación, transfiriendo los datos de variación del índice de refracción para la generación de trazas phase sensitive OTDR modificadas.

3.3.6. Módulo demodulador de fase

El módulo demodulador de fase es el encargado de procesar los datos en las trazas phase sensitive OTDR para recuperar las perturbaciones ambientales que se actúan sobre la fibra. Para lograr esto, lo primero es diseñar un sistema de adquisición de datos para obtener la fase del campo eléctrico de backscattering.

En esta memoria no se consideró la simulación de un sistema de adquisición de datos como los estudiados en la sección 2.6. Sin embargo, se desarrolló una herramienta que simula los resultados que dicho sistema podría tener.

Como se explica en las secciones 2.4 y 2.6, el sistema de adquisición de datos se compone de un fotodetector que recibe un campo eléctrico E . A partir de este campo eléctrico, se extrae la intensidad I . Luego, mediante un sistema electrónico y diferentes configuraciones de conexiones ópticas, se puede deducir información sobre las fases F de los campos eléctricos de backscattering, o al menos, sobre las variaciones de las fases [47].

Se implementa un sistema de adquisición de datos, siguiendo una filosofía de **caja negra**, es decir, se asume una configuración de fotodetector y electrónica que tiene como entrada el campo eléctrico de backscattering y se obtiene la información de fase y magnitud de dicho campo. Una representación de este sistema se puede observar en la figura 35. Ni el fotodetector ni la intensidad del campo ni el sistema de procesamiento de datos son simulados explícitamente, solamente se simulan las entradas y salidas del sistema de adquisición de datos.

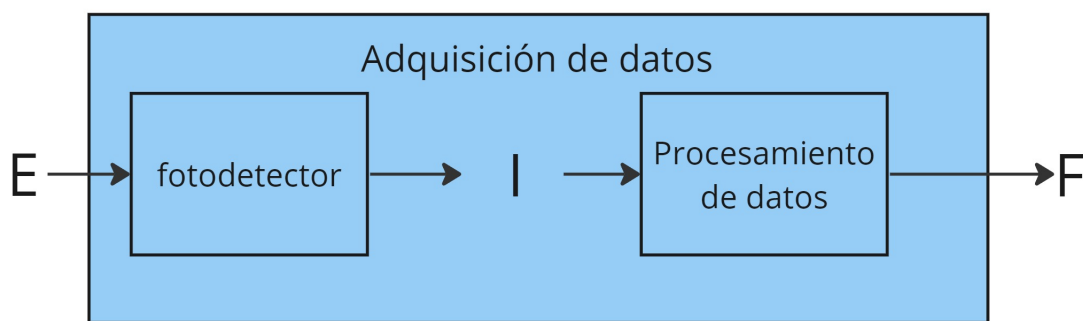


Figura 35: Diagrama del diseño del sistema de adquisición de datos del simulador, E representa el campo eléctrico incidente, I representa la información de la intensidad del campo eléctrico y F representa la información relevante sobre la fase del campo eléctrico, obtenida por medio de un sistema de procesamiento de datos.

Es a partir del sistema de adquisición de datos anterior que se recupera toda la información relevante para el procesamiento de las trazas phase sensitive OTDR.

El módulo de demodulación de fase requiere que inicialmente se almacene una traza phase-sensitive OTDR de referencia. Para este fin, se debe tener un módulo Rayleigh previamente configurado. Una vez fijada la traza de referencia, es posible realizar cambios en la misma fibra mediante el módulo perturbador y luego utilizar el módulo de demodulación de fase para recuperar las variaciones de fase en forma de variaciones en el índice de refracción.

La existencia de este módulo permite validar la utilización del simulador para las tareas de DAS y DTS para las cuales fue diseñado el simulador.

A continuación, se revisa el algoritmo de recuperación de la variación en el índice de refracción. Para esto, se aplica una perturbación que induce una variación de $5 \cdot 10^{-9}$ del índice de refracción entre los 299 m a 501 m. Con una fibra de longitud de 1 km y un largo de segmento L_{seg} de 1 m. Es decir, podría considerarse que la perturbación ocurre entre los segmentos 300 a 500. En esta simulación, se tienen las siguientes propiedades de propagación:

- $\lambda_0 = 1550 \mu\text{m}$
- $V_p = 2,02623 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- $D = 10 \text{ m}$
- $D_{seg} = 10 \text{ segmentos}$
- $L_{seg} = 1 \text{ m}$
- $f_s = 1,01312 \cdot 10^8 \text{ Hz}$

El algoritmo de recuperación de variación del índice de refracción efectivo es el siguiente:

1. Se calcula la fase de la traza de referencia y la traza modificada por la perturbación.

Gracias a la ecuación 46 es posible determinar la fase de la traza de backscattering asociada a la posición discreta p mediante la expresión:

$$\Phi(p) = \text{angle}(E_0) - 2\beta L_{\text{seg}}p + \Lambda(p) \quad (55)$$

Donde $\Lambda(p)$ se define como la fase de los campos de backscattering propagados asociados a los reflectores acumulados R :

$$\Lambda(p) = \arctan\left(\frac{\sum_{k=p}^{p+D_{\text{seg}}/2} R_k \sin(2\beta L_{\text{seg}}(k-p))}{\sum_{k=p}^{p+D_{\text{seg}}/2} R_k \cos(2\beta L_{\text{seg}}(k-p))}\right) \quad (56)$$

De la ecuación 56, se puede deducir que la función $\Lambda(p)$ es una variable aleatoria con un dominio entre $-\pi$ y π ⁹, cuya aleatoriedad estará ligada a los valores de R_k , y, por lo tanto, será invariante en el tiempo si no ocurren perturbaciones, caracterizando así cada punto de la traza con dicha variable. En caso de existir perturbaciones en el índice de refracción, dichas variaciones se reflejarán sobre la constante de fase β de la ecuación 55.

En la figura 36 se puede observar la fase calculada para ambas trazas, se puede ver que al inicio de la fibra, en los puntos donde no ocurren perturbaciones, no existen diferencias. Por otro lado, la aleatoriedad de la fase viene dada por la variable $\Lambda(p)$.

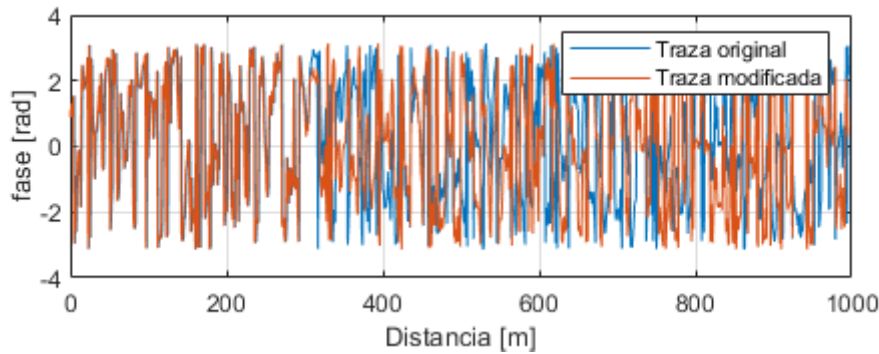


Figura 36: Fases de las trazas

Este paso es necesario para poder tener las fases de los campos eléctricos.

En la curva obtenida en este paso, cada punto de la traza está asociado con una sumatoria de los campos generados y propagados por la mitad del pulso. De esta manera, el i -ésimo punto representa un intervalo de puntos dado por $[p_i, p_i + D_{\text{seg}}/2]$, donde p_i es la posición discreta.

2. Se realiza un desenvolvimiento de fase espacial para ambas trazas.

Este paso tiene como objetivo obtener la acumulación total de fase entre puntos de la traza phase sensitive OTDR.

En la figura 37 se puede observar el resultado del desenvolvimiento para ambas trazas. Es posible notar cómo la fase desenrollada es un proceso de caminata aleatoria, esto puede ser explicado por la variable $\Lambda(p)$ de la ecuación 55.

Dado que ambas trazas se originan de la misma fibra, se puede apreciar la similitud entre ellas, aunque existe una diferencia entre ambas asociada a la perturbación introducida.

⁹Determinar la distribución exacta de la variable $\Lambda(p)$ escapa a los objetivos de esta memoria.

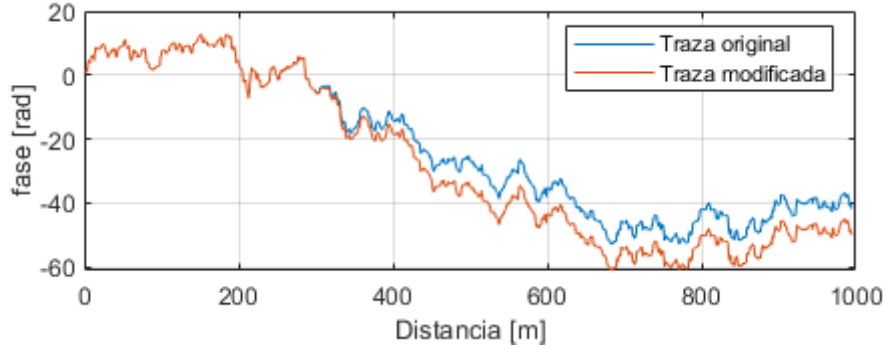


Figura 37: Fases de las trazas desenvueltas

- Se calculan las trazas de fase diferenciales $dif\{\Phi\}$ como la diferencia de las fases desenvueltas entre los puntos p y $p + G_L$, donde G_L define el gauge length. En este caso, se tendrá un gauge length de 6 posiciones discretas o 6 metros (equivalentes debido a que L_{seg} es 1 m). Esto permite obtener **la fase acumulada en una distancia de G_L** .

Teniendo en cuenta la ecuación 55 se puede determinar que $dif\{\Phi\}$ es:

$$dif\{\Phi(p)\} = -2\beta L_{seg} G_L + \Lambda(p + G_L) - \Lambda(p) \quad (57)$$

De esta forma, es posible analizar que la curva obtenida en cada una de las trazas tiene un comportamiento aleatorio debido a las variables $\Lambda(p)$ y $\Lambda(p + G_L)$.

El cálculo realizado está asociado a la resta entre dos puntos de la traza, de manera que el i -ésimo punto de la traza caracteriza dos intervalos dados por $I_1 = [p_i, p_i + D_{seg}/2]$ y $I_2 = [p_i + G_L, p_i + G_L + D_{seg}/2]$.

En la figura 38 se puede observar el resultado de este proceso. Dado que los puntos restados de la traza tienen un valor aleatorio, la resta de ambos también es un valor aleatorio. Sin embargo, en este caso es posible observar la zona exacta donde existen diferencias entre las trazas, aproximadamente entre los 300 y 500 metros. Esto se debe a que, al calcular la diferencia de fase entre ambos puntos, es posible aislar los puntos en los cuales ocurre la variación de fase.

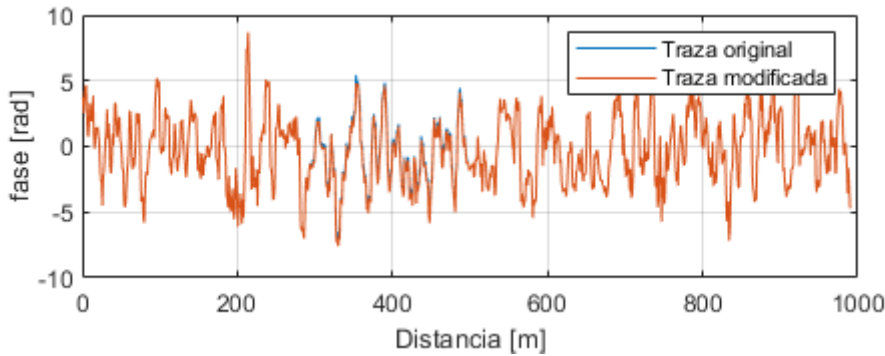


Figura 38: Fases diferenciales

- Se calcula la diferencia entre las fases diferenciales $dif\{\Phi\}$ simuladas para diferentes momentos de interrogación, a esta curva se le llama $\Delta dif\{\Phi(p)\}$:

$$\Delta dif\{\Phi(p)\} = -2\beta' L_{seg} G_L + 2\beta L_{seg} G_L + \Lambda'(p + G_L) - \Lambda(p + G_L) - \Lambda'(p) + \Lambda(p) \quad (58)$$

Donde los términos sin comilla representan la medición de referencia. De esta forma si todos los términos de traza de backscattering futura están modificados por una variación del índice de refracción $\Delta\bar{n}$, equivalente a una variación en la constante de fase $\Delta\beta$, la curva $\Delta dif\{\Phi(p)\}$ vendrá dada por:

$$\Delta dif\{\Phi(p)\} = -2\Delta\beta L_{seg} G_L + \Delta\Lambda(p + G_L) - \Delta\Lambda(p) \quad (59)$$

Donde $\Delta\Lambda(p)$ representa la variación en la fase de los campos eléctricos de backscattering asociados a los reflectores acumulados R en la posición discreta p :

$$\Delta\Lambda(p) = \arctg\left(-\frac{\sum_{k=p}^{p+D_{seg}/2} R_k \sin(2(\beta + \Delta\beta)L_{seg}(k-p))}{\sum_{k=p}^{p+D_{seg}/2} R_k \cos(2(\beta + \Delta\beta)L_{seg}(k-p))}\right) - \arctg\left(-\frac{\sum_{k=p}^{p+D_{seg}/2} R_k \sin(2\beta L_{seg}(k-p))}{\sum_{k=p}^{p+D_{seg}/2} R_k \cos(2\beta L_{seg}(k-p))}\right) \quad (60)$$

De la ecuación 60, es posible deducir que $\Delta\Lambda(p)$ es una variable aleatoria que no depende únicamente del valor de R_k , sino que también depende del valor de $\Delta\beta$, pues la diferencia entre los términos de la ecuación 60 depende directamente de este valor. De esta manera, $\Delta\beta$ modifica las propiedades de la distribución aleatoria de $\Delta\Lambda(p)$. Mayores valores de $\Delta\beta$ causarían un aumento en la **probabilidad** de que $\Delta\Lambda(p)$ resulte en un valor mayor. Sin embargo, dado que usualmente $\Delta\beta$ tendrá valores bajos para las perturbaciones trabajadas, entonces dichos efectos se encontrarán, normalmente, acotados.

En la figura 39 se puede observar el resultado de este proceso, obteniéndose las diferencias de fase $\Delta\Phi$ en la zona perturbada.

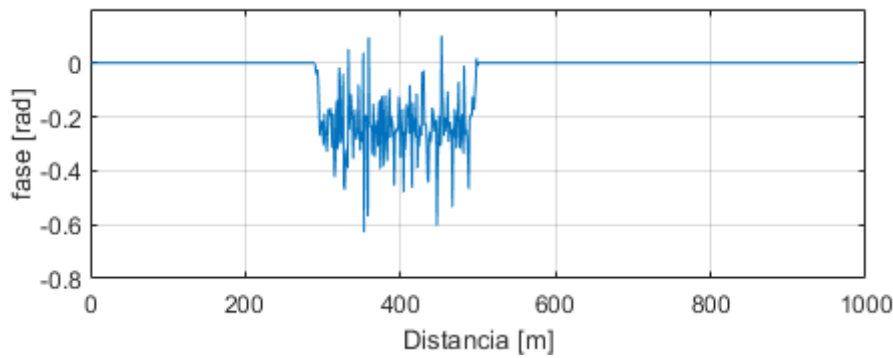


Figura 39: Curva de diferencia de fases diferenciales

5. Dado que [14]:

$$\beta = \bar{n}k_0 \quad (61)$$

Entonces trivialmente:

$$\Delta\beta = \Delta\bar{n}k_0 \quad (62)$$

Donde $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$.

De esta forma, se divide la curva $\Delta dif\{\Phi\}$ obtenida en el punto anterior por $-2L_{seg}k_0G_L$:

$$\Delta\bar{n} \approx \Delta\bar{n} + \frac{\Delta\Lambda(p+G_L)}{-2L_{seg}k_0G_L} - \frac{\Delta\Lambda(p)}{-2L_{seg}k_0G_L} \quad (63)$$

El resultado es de este proceso es $\Delta\bar{n}$ más las dos variables aleatorias $\Delta\Lambda(p)$ y $\Delta\Lambda(p+G_L)$ escaladas, como se explico en el punto anterior, los valores de estas variables se encuentran acotados, por lo cual, se espera que la curva obtenida oscile alrededor del valor de $\Delta\bar{n}$

En la figura 40 se observa el resultado de llevar a cabo este proceso; la curva oscila los $5 \cdot 10^{-9}$, lo cual corresponde con la perturbación introducida al sistema

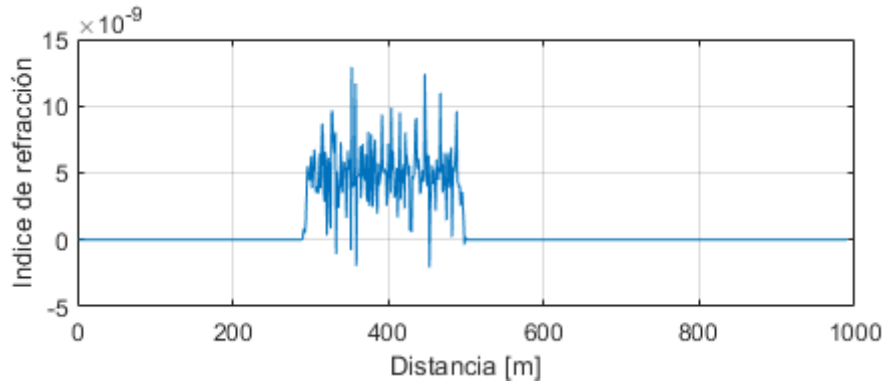


Figura 40: Resta de fases diferenciales escalada

El algoritmo puede detenerse en este punto, pues ya se tiene una aproximación para el valor de $\Delta\bar{n}$. A partir de este último valor es posible recuperar el valor de la variación de temperatura o tensión mediante las ecuaciones 53 y 54. Sin embargo, debido a la alta incertidumbre en los datos presentes en este punto del algoritmo (la cual puede apreciarse en la figura 40), es prudente realizar un procesamiento de datos para obtener una mejor lectura de los resultados.

6. Como se explica en el punto anterior, este paso es opcional en caso de desear obtener una curva de \bar{n} más suave. Para lograrlo en esta implementación se aplica un filtro pasa bajos sobre la curva anterior mediante un promedio móvil con un ancho ΔP calculado desde el punto 0, tomando ΔP puntos hacia adelante. Es decir, la traza generada tendrá menos puntos.

Al llevar a cabo este proceso, se reduce la resolución espacial de la curva; sin embargo, se obtiene un valor de \bar{n} con una incertidumbre mucho menor que la obtenida en el paso anterior. Esto implica un compromiso y queda a criterio de diseño determinar qué resultado utilizar, la curva con o sin filtro.

En la figura 41 se puede observar el resultado del filtrado realizado, obteniéndose un valor de \bar{n} con una incertidumbre mucho menor que la obtenida en la figura 40. Nuevamente, la variación oscila en torno a los $5 \cdot 10^{-9}$.

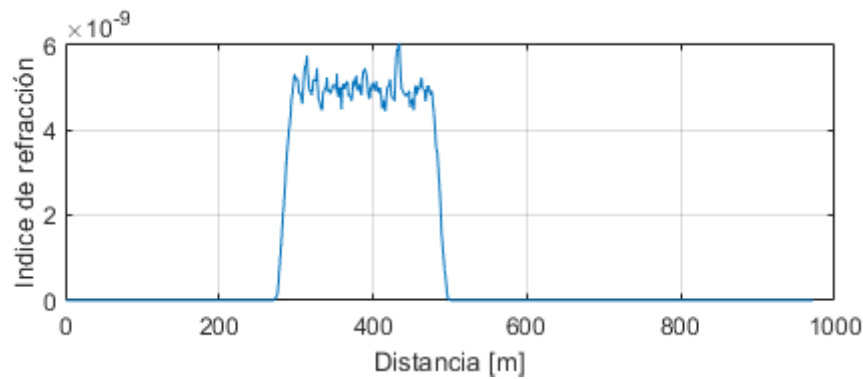


Figura 41: Promedio móvil de la figura anterior

En este paso, cada punto representa el promedio de un conjunto de intervalos. Es decir, el i -ésimo punto caracteriza una serie de intervalos donde el primero está dado por:

$$I_{\text{init}} = [p_i, p_i + D_{\text{seg}}/2] \quad (64)$$

y el último viene dado por

$$I_{\text{final}} = [p_i + G_L + \Delta P, p_i + G_L + D_{\text{seg}}/2 + \Delta P] \quad (65)$$

De esta manera, en la figura 41, se puede observar que la variación comienza a los 300 metros y termina en los 500 metros, lo cual concuerda con la perturbación introducida.

7. Finalmente, es posible conocer la variación del índice de refracción efectivo y, gracias a las ecuaciones 53 y 54, es posible interpretar estas variaciones como cambios de temperatura o tensión.

En el algoritmo presentado, se realizan una serie de cálculos entre puntos de la traza. Cada punto de la traza representa un intervalo espacial. Por lo tanto, es importante interpretar correctamente las distancias al final de este proceso. En general, va a ser de interés saber las posiciones de inicio y final de las perturbaciones. Para realizar esta interpretación, se considera lo siguiente:

- Si se desea interpretar un punto de la traza como la distancia inicial de la perturbación, en ese caso, el punto inicial deberá ser interpretada como la mayor distancia que identifica. Por ejemplo, cada punto de la traza $\Delta\text{dif}\{\Phi(p)\}$ sin filtrar identifica dos intervalos, $I_1 = [p_i, p_i + D_{\text{seg}}/2]$ y $I_2 = [p_i + G_L, p_i + G_L + D_{\text{seg}}/2]$. De esta forma, el punto más alejado viene dado por $p_i + G_L + D_{\text{seg}}/2$.
- Por otro lado, si se desea interpretar el punto de la traza como la distancia final de la perturbación, en ese caso, el punto final deberá ser interpretada como la menor distancia que identifica. Por ejemplo, si un punto de la traza $\Delta\text{dif}\{\Phi(p)\}$ se interpreta como punto final, entonces el punto más cercano y la distancia de término de la perturbación será la posición discreta p_i .

En el simulador diseñado, encontrar el valor de los puntos de inicio y final de la perturbación es trivial, pues solamente hay que encontrar el punto en el cual la diferencia de fases diferenciales $\Delta\text{dif}\{\Phi\}$ deja de ser cero. Sin embargo, en un sistema real, esto no es tan sencillo, pues la existencia de ruido en el sistema de adquisición de datos hará que siempre haya puntos en donde $\Delta\text{dif}\{\Phi\}$ sea distinto de cero.

El módulo de demodulación de fase tiene las capacidades de recuperar el valor de $\Delta\bar{n}$, teniendo en cuenta que dichos valores son aproximados. Para poder realizar un cálculo más exacto del valor de $\Delta\bar{n}$, es razonable analizar de manera particular las curvas de $\Delta\text{dif}\{\Phi\}$.

Debido a que el módulo de demodulación de fase opera solo con los campos de backscattering, puede funcionar con diversos módulos Rayleigh. En cada una de las operaciones del módulo de demodulación de fase, se debe especificar bajo qué módulo Rayleigh operará.

Para la inicialización del módulo de demodulación de fase, solamente se requiere del Gauge length, el cual puede ser cambiado posteriormente, y el proceso de inicialización consiste en el almacenamiento de dicho parámetro.

Para el proceso de cálculos de variación de índice de refracción, se requerirá de la previa fijación de una traza de referencia. Esto técnicamente hará que la traza quede fija a una dupla emisor-fibra; sin embargo, no hay nada que impida que, por ejemplo, se varíe el emisor en distintas iteraciones del uso del módulo de demodulación de fase.

Aunque por defecto el módulo de demodulación de fase no considera ruido en las mediciones, es posible simularlo luego de finalizada la inicialización por medio de funciones provistas. Para este fin se deben ingresar dos parámetros: el valor medio del ruido y la desviación estándar del mismo.

El ruido se calcula de la siguiente forma: se añade un número complejo gaussiano circular de valor medio y desviación estándar según lo ingresado. Dicho número aleatorio será sumado a todos los campos simulados por el módulo Rayleigh. De esta forma, el ruido afecta a toda la señal adquirida, no solo a la magnitud o a la fase.

En un sistema real, el ruido afecta al fotodetector y, por lo tanto, a la intensidad de la luz. Luego, la información del fotodetector es utilizada de distintas maneras para recuperar información sobre la fase (esto se estudia en profundidad en la sección 2.4). Por consecuencia, la fase recuperada al final del proceso tiene errores (ruido). Sin embargo, en el simulador diseñado no se simula un fotodetector y, por lo tanto, **no es posible simular ruido de intensidad**. Es por este motivo que el ruido introducido al sistema es ruido óptico, o ruido del campo eléctrico, el cual, en un sistema real, puede ser causado por interferencia electromagnética en la fibra, ruido en amplificadores, etc.

Finalmente, se tiene un módulo capaz de generar trazas phase sensitive OTDR de referencias, generar trazas en tiempos posteriores, generar curvas de variaciones de fase, calcular la variación del índice de refracción, realizar filtración de las curvas, interpretar las mismas para entregar información de manera automatizada y simular el ruido óptico.

3.4. Validaciones de los modelos

Durante el trabajo realizado y aquí presentado, se consideraron una serie de modelos, aproximaciones y decisiones de diseño que determinan el funcionamiento de la simulación. Sin embargo, es necesario asegurarse de que, dadas todas las consideraciones anteriores, el trabajo desarrollado sea lo suficientemente realista para considerarse una referencia adecuada para ser utilizada como simulador de un fenómeno del mundo físico. Es por este motivo que se hace necesario que todos los componentes desarrollados tengan coherencia con los resultados teóricos esperables del sistema físico que simulan. La siguiente sección tiene como objetivo validar todos los componentes que conforman el simulador, de modo que se confirme que este sistema es adecuado para su utilización como simulador.

La sección se estructurará a través de una serie de explicaciones de las pruebas a realizar, una predicción teórica de lo que debería obtenerse si el modelo fuera acertado en relación con la realidad, una presentación de los resultados de la simulación dados los parámetros indicados y un análisis de los resultados.

3.4.1. Propagación de un pulso por la fibra

La primera función a validar es la capacidad de emitir un pulso en la fibra y que éste se propague de manera clásica. A continuación, se presenta una prueba consistente en propagar un campo eléctrico desde un emisor ubicado en $z = 0$ hasta el final de la fibra.

Para la siguiente simulación, se utilizan los siguientes parámetros de entrada.

■ **Para la fibra:**

- $n_1 = 1,5$
- $n_2 = 1,46$
- $a = 1,7 \mu\text{m}$
- $L = 200 \text{ Km}$
- $L_{seg} = 0,5 \text{ m}$

■ **Para el emisor:**

- $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$
- $E_0 = 2 \text{ V/m}$
- $\tau_d = 50 \text{ ns}$

■ **Parámetros de propagación:** Estos parámetros se obtienen con los cálculos de la sección 2.1.

- $\alpha = 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ Np/m}$
- $\beta = 6,002 \cdot 10^6 \text{ rad/m}$
- $b = 0,5126$
- $\bar{n} = 1,4805$
- $V = 2,3712$
- $V_p = 2,0263 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- $D \approx 5 \text{ m}$
- $D_{seg} = 10 \text{ segmentos}$

De esta manera, se espera que entre los puntos de la traza y entre segmentos de fibra óptica haya una distancia de 0,5m, con una atenuación por un factor de atenuación de 2,718233 Np/segmento, o -8.68589 dBm/segmento. Así, en 200 Km simulados, se produce una atenuación total por un factor de $8,42 \cdot 10^{-4}$ o una variación de -61,494 dBm.

Entre segmentos de fibra óptica, habrá una acumulación de fase de $-3,001 \cdot 10^6 \text{ rad}$. Debido a la gran acumulación de fase, es difícil corroborar la propagación debido al envolvimiento. Por lo tanto, se introduce un factor de escalamiento de β que permite disminuir el valor de β para que sea más sencillo captar la fase acumulada. El factor introducido es de $1/2 \cdot 10^{-6}$, de forma que β tiene un valor de 3,001. La nueva fase acumulada por segmento es de aproximadamente -1,5005 rad/segmento.

Para comprobar que se cumplan las predicciones, se realiza una propagación con los parámetros correspondientes, generando un arreglo de números complejos. Cada uno de ellos representa el campo eléctrico a una distancia específica. Para corroborar el correcto funcionamiento de la atenuación, se considera el campo eléctrico en el punto inicial (distancia $z = 0\text{Km}$) y el punto final (distancia $z = 200\text{Km}$) y se verifica que exista una variación equivalente a -61,5 dBm.

Para la fase, se consideran dos puntos adyacentes y se verifica que la variación de fase corresponda con lo calculado:

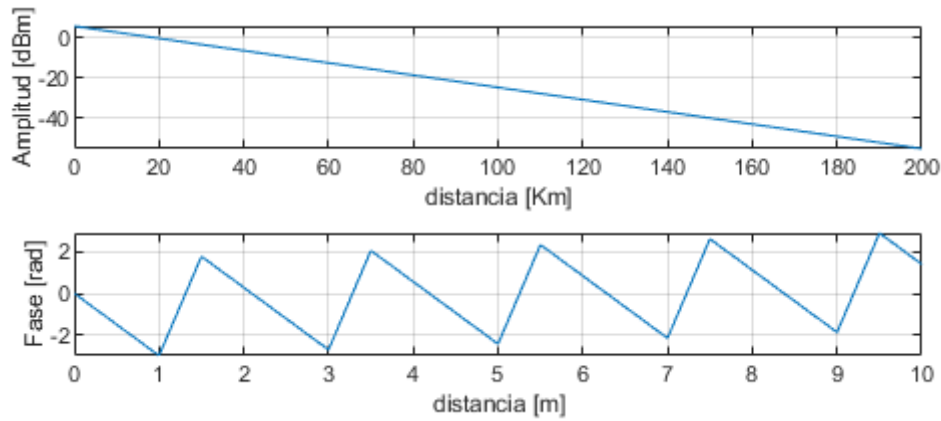


Figura 42: Propagación de un campo eléctrico simulado, arriba se observa la magnitud del campo eléctrico, abajo se observa la fase del campo eléctrico

De la figura 42, se puede observar que la diferencia de amplitud tiene aproximadamente un valor de -61 dBm, como fue calculado teóricamente.

Por otro lado, la pendiente de la fase o la fase acumulada entre puntos es de $-1,50051$ rad .

Los resultados obtenidos son muy cercanos a los calculados de manera analítica. De lo anterior, se puede deducir que el modelo de propagación es correcto y adecuado, logrando simular de buena manera el comportamiento del campo eléctrico propagado.

Por otro lado, en la figura 42, se puede observar el efecto de envolvimiento de fase, ya que el dominio de la fase se encuentra limitado entre $[-\pi, \pi]$.

3.4.2. Efectos de las perturbación sobre la propagación del pulso

Otra funcionalidad importante para que la simulación sea cercana a la realidad es que las variaciones de temperatura y tensión deben tener consecuencias no solamente sobre la traza phase sensitive OTDR, sino que naturalmente deben verse representadas en la fase del campo eléctrico incidente propagado. Esto es importante, ya que la fase agregada o disminuida en un punto específico debe verse en todo el resto de puntos siguientes en la fibra.

Para la siguiente prueba, se hará uso de la misma fibra y emisor de la prueba anterior; por el mismo motivo, los parámetros de propagación se mantendrán invariables con respecto a la última simulación.

Por otro lado, se utilizarán los siguientes parámetros termo-ópticos:

- $\gamma_T = 3,12 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1}$
- $\eta_T = 1,72 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$

Los parámetros tenso-ópticos son los siguientes:

- $\mu_T = 0,17$
- $p_{11} = 0,121$
- $p_{12} = 0,27$

Debido a que se requiere inspeccionar la diferencia entre las fases, el procedimiento que se realiza es el siguiente:

1. Simular una propagación de referencia sin perturbaciones.
2. Aplicar la perturbación en la fibra.
3. Simular una propagación con perturbaciones.
4. Calcular la diferencia entre ambos resultados.

El resultado esperado es que varíe únicamente la fase de manera lineal. Esto se puede ver gracias a las ecuaciones 36 y 37, donde la diferencia de fase tiene un comportamiento lineal con la distancia. Dado que la variación se da únicamente en la fase de la propagación, la amplitud no debería tener variación alguna.

Se realizarán 3 pruebas para verificar la correcta modificación de las fases.

- Prueba termo-óptica:** Se introducen 2 variaciones de temperatura, la primera consistente en 50 K desde los 10 Km hasta los 12 Km y la segunda de -20 K desde los 100 Km hasta los 120 Km. Dada la ecuación 36 que describe el comportamiento de la fase ante variaciones de temperatura, se calcula que esto corresponde a una variación de fase lineal, dada por -1158.72 rad entre 10 Km a 12 Km y 4634.91 rad entre los 100 Km a 120 Km, resultando finalmente en una diferencia de fase de aproximadamente 3476.18 rad.

En las figuras 43 se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación:

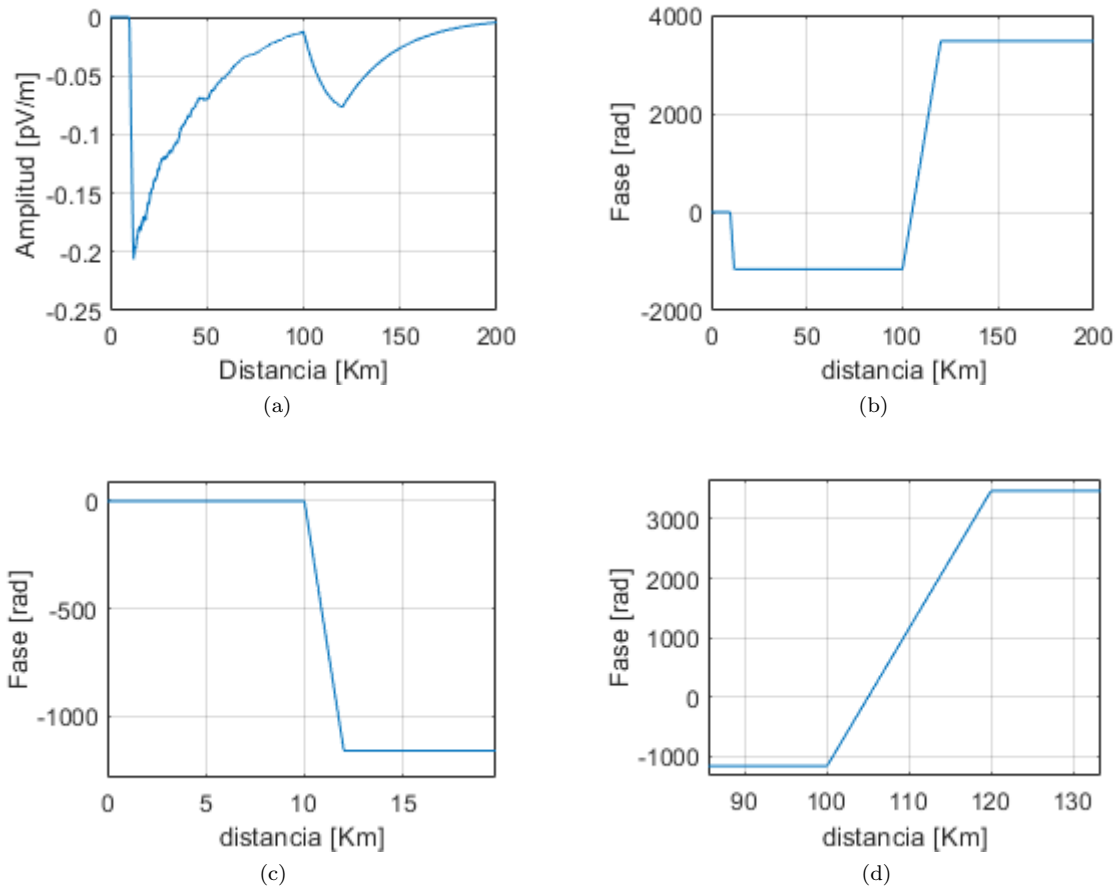


Figura 43: Variación de propagación con perturbación térmica. (a) Variación de amplitud para la perturbación térmica. (b) Variación de fase para la variación térmica. (c) Zoom a la primera pendiente en la variación de fase, asociado a una variación térmica 50 K. (d) Zoom a la segunda pendiente en la variación de fase, asociado a una variación térmica -20 K

De las figura 43 (c) y (d) se puede ver que el efecto de las perturbaciones térmicas en las fases desenvueltas, las variaciones de las fases tienen una curva lineal, lo cual es esperado dada la ecuación 36 [54], que describe la relación entre la variación de temperatura y el cambio de fase. Además, se puede observar que los valores numéricos para las variaciones de fase coinciden con los previamente calculados.

Sin embargo, de las figuras 43 (a) y (b) se observa que existe una diferencia en la amplitud del campo eléctrico que no fue predicha y no debiese encontrarse. No obstante, al observar la magnitud de dichas diferencias, es posible determinar que son debidas a la precisión de los números que se utilizan por la arquitectura (Matlab). Por lo tanto, estas diferencias son despreciables.

- Prueba tenso-óptica:** Se introducen 2 variaciones de tensión, la primera consistente en $0.5 \mu\epsilon$ desde los 20Km hasta los 20.5 Km y una segunda de $0.9 \mu\epsilon$ desde los 120 Km hasta los 122 Km, de forma que dada la ecuación 37 que define el comportamiento de la variación de fase ante perturbaciones de tensión, resulta en una variación lineal de fase de -1165.7 rad desde los 20 Km a los 20.5 Km y -8393 rad entre los 120 Km a 122 Km, de forma que la variación final acumulada corresponde a -9558.7 rad.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

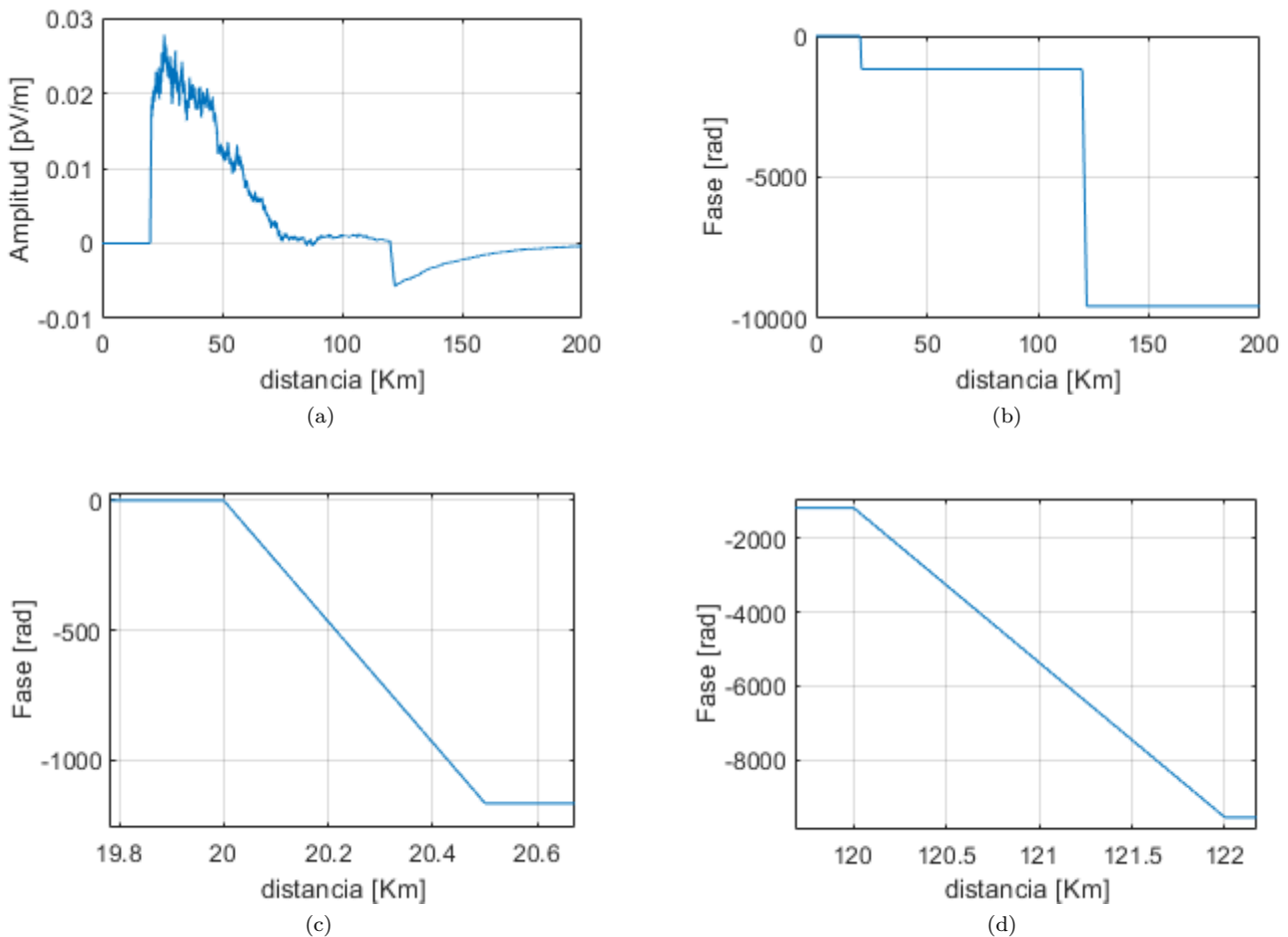


Figura 44: Variación de propagación con perturbación tensorial. (a) Variación de amplitud para la variación tensorial. (b) Variación de fase asociado a la variación tensorial. (c) Zoom a la primera pendiente asociado a una variación tensorial de $0.5 \mu\epsilon$. (d) Zoom a la segunda pendiente en la variación de fase asociado a una variación tensorial de $0.9 \mu\epsilon$

De la misma manera que antes, es posible comprobar que la variación de fase es aproximadamente la esperada y que las variaciones asociadas a la amplitud se deben a la precisión numérica de Matlab.

- Prueba mixta:** El simulador debe ser capaz de introducir variaciones de fases asociadas a distintas perturbaciones, incluso si estas ocurren en el mismo espacio. Esta prueba tiene por objetivo comprobar el efecto en la fase de una variación de temperatura y tensión en una misma zona.

Para la prueba, se realizó una variación térmica de -3 K desde los 90 Km hasta los 120 Km , seguida de una variación tensorial de $1.1 \mu\epsilon$ desde los 95 Km hasta los 98 Km . De las ecuaciones 36 y 37 se deduce que esto es equivalente a una variación de fase de 1042.9 rad y -14344 rad respectivamente, con una fase acumulada total de -14344 rad aproximadamente.

Además, se espera que la curva de la variación en la fase tenga una pendiente ascendente desde los 90 Km hasta 120 Km , asociada a la variación de temperatura, con una abrupta caída asociada a una pendiente de bajada desde los 95 Km hasta los 98 Km debido a la variación de tensión.

A continuación se encuentran los resultados de esta simulación:

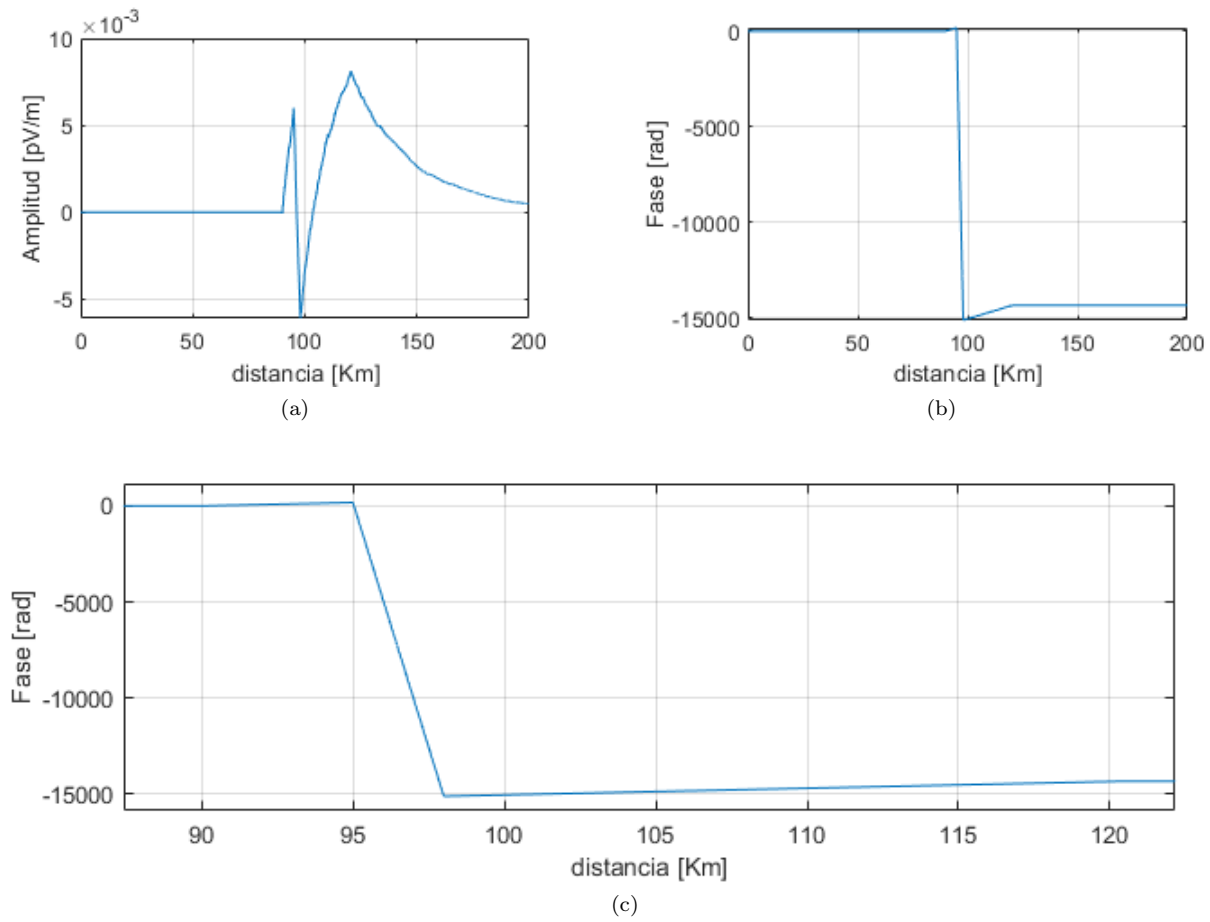


Figura 45: Variación de propagación con perturbación térmica y tensorial. (a) Variación de amplitud de la variación térmica y tensorial. (b) Variación de fase de la variación térmica y tensorial. (c) Zoom a las pendientes de la fase de la propagación con perturbación térmica y tensorial

De igual manera que antes, de la figura 45 (b) se observa que las variaciones de fase se aproximan a lo esperado, mientras que de la figura 45 (a) se observa que la amplitud posee una variación asociada a la precisión numérica de matlab. De la figura 45 (c), se puede observar que los resultados obtenidos son los esperados, mostrando una pendiente positiva asociada al cambio de temperatura y una abrupta caída debido a la tensión introducida.

Se puede deducir que el comportamiento simulado se encontró siempre dentro de márgenes adecuados. Existen diferencias entre los resultados teóricos y los resultados simulados; sin embargo, estos pueden ser asociados a la precisión numérica de matlab. Por lo mismo, dichas variaciones no alcanzan magnitudes que sean relevantes para el correcto funcionamiento del simulador, pero deben ser tomadas en cuenta a la hora de trabajar con magnitudes muy pequeñas.

Finalmente, las pruebas realizadas en esta sección validan por completo el modelo de variación de fase por variaciones de tensión y temperatura además su efecto sobre las propagaciones.

3.4.3. Generación de reflectores

Una parte crucial del funcionamiento del simulador es la capacidad para crear reflectores acumulados, como se describe la sección 3.3.5. Estos deben tener una distribución Rayleigh en su amplitud y una distribución uniforme en su fase.

En la siguiente serie de pruebas, se realiza la generación de una fibra de 1 km de longitud con segmentos de tamaños de 1 mm, 1 cm, 1 m, 10 m, con el objetivo de verificar que en todos los casos se distinga la distribución esperada para los reflectores acumulados. Para corroborar esto, se generan los arreglos de reflectores acumulados y se gráfica un histograma de las magnitudes y fases.

Se utiliza una semilla aleatoria con un valor de 3 y una distribución estándar arbitrariamente elegida como 0.01.

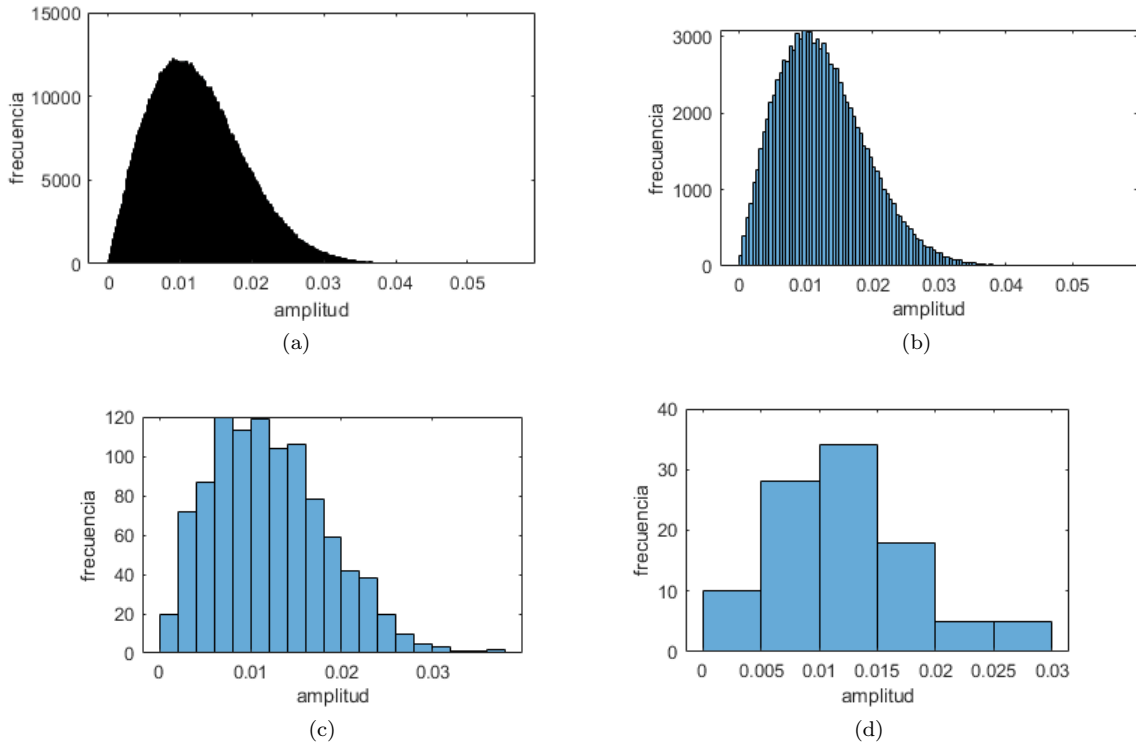


Figura 46: Histogramas de amplitudes de reflectores con distinto tamaño de segmento. (a) Histograma de amplitud con segmentos de tamaño 1 mm. (b) Histograma con segmentos de tamaño 1 cm. (c) Histograma de amplitud con segmentos de tamaño 1 m. (d) Histograma de amplitud con segmentos de tamaño 10 m.

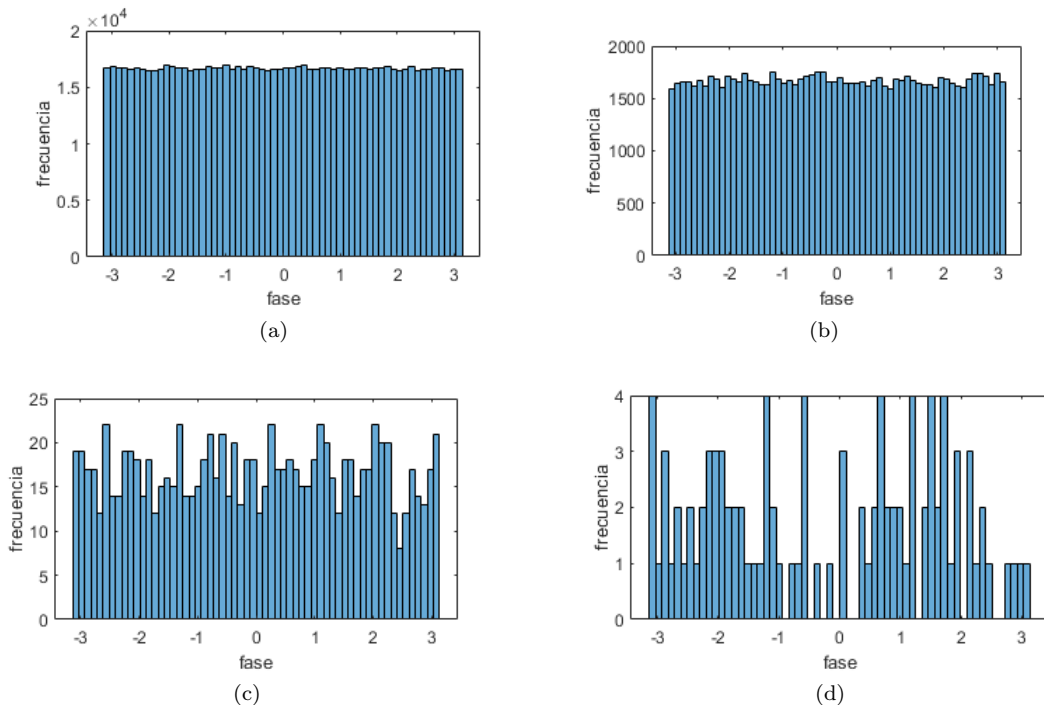


Figura 47: Histograma de fases de reflectores con distinto tamaño de segmento. (a) Histograma de fase con segmentos de tamaño 1 mm. (b) Histograma de fase con segmentos de tamaño 1 cm. (c) Histograma de fase con segmentos de tamaño 1 m. (d) Histograma de fase con segmentos de tamaño 10 m.

De las figuras 46 y 47, se puede observar el comportamiento de la distribución de los reflectores, la cual, como era de esperar, es Rayleigh para la amplitud y uniforme para la fase.

Al aumentar el tamaño de los segmentos, la distribución en amplitud y fase va perdiendo su forma característica,

reflejando la falta de precisión que representa.

De las figuras 47, es posible observar que la fase es más sensible al tamaño de los segmentos. Al analizar el histograma (b) comparado con el (c), en el cual la diferencia del tamaño de segmento es un factor de 10, se puede observar una variación considerable sobre las fases generadas, viendo que la distribución uniforme se encuentra distorsionada. Por otro lado, es posible observar que a partir de la figura (d), las fases obtenidas ya no poseen la regularidad común de los reflectores acumulados, por lo cual ese tamaño es inadecuado debido al tamaño de la fibra.

A pesar de que la amplitud de los reflectores no es de suma importancia para este trabajo en particular, es importante ser riguroso con la realidad. De estos resultados, se puede observar que la amplitud es más robusta a la diferencia de tamaño de segmentos, siempre presentando altas similitudes con el perfil de una distribución Rayleigh.

Los resultados anteriores son capaces de validar por completo el funcionamiento de la generación de reflectores acumulados, los cuales son esenciales para la generación de las trazas.

3.4.4. Generación de trazas Phase Sensitive OTDR

Probablemente la parte más importante del simulador es la capacidad de generar trazas Phase Sensitive OTDR y que éstas sean coherentes con resultados esperables en la realidad.

Esta sección de simulación tiene por intención corroborar cada una de las características que debe tener una traza Phase Sensitive OTDR, deduciendo que la traza recuperada es, en efecto, la esperada.

Para esta simulación se utilizan los siguientes parámetros de la fibra:

- $n_1 = 1,5$
- $n_2 = 1,46$
- $a = 1,7 \mu\text{m}$
- $L = 50 \text{ km}$
- 1 m

El emisor tiene los siguientes parámetros:

- $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$
- $E_0 = 2 \text{ V/m}$, con fase aleatoria.
- $\tau_d = 100 \text{ ns}$

Los parámetros de propagación son los mismos que los descritos en la sección 3.4.1 con la diferencia de que el ancho del pulso espacialmente es de $D \approx 20 \text{ m}$, por lo cual el ancho del pulso en segmentos D_{seg} es 20 segmentos.

El módulo Rayleigh tiene una semilla aleatoria¹⁰ de 3 y una desviación estándar de 0.01.

Dada la ecuación 49 que describe la máxima frecuencia de muestreo implementable en el simulador, considerando el tamaño de los segmentos L_{seg} y las propiedades propagativas, la máxima frecuencia de muestreo implementable en la simulación es de 101.32 MHz y las frecuencias de muestreo disponibles estarán dadas por $101,32/m \text{ MHz}$, donde m es un número natural.

Se estudian los siguientes aspectos de la traza del campo eléctrico de backscattering:

- **Amplitud:** Debido a que la amplitud de la traza de backscattering está determinada por los reflectores aleatorios y por el campo incidente, el pulso propagado se compone de una parte determinista ligada a la propagación del campo eléctrico y una parte aleatoria ligada a los reflectores.

El campo eléctrico incidente disminuye en magnitud a medida que se propaga debido a la constante de atenuación α . Como el campo eléctrico de backscattering se produce del producto entre el campo eléctrico incidente y los reflectores, los puntos de la traza están dados por puntos aleatorios regidos por los reflectores, que siguen, en su conjunto, una tendencia exponencial descendiente, regida por la constante de atenuación α

En resumen, esto tiene por consecuencia que la curva esperada está dada por una caminata aleatoria con una tendencia exponencial descendiente [22].

- **Distribución de la amplitud:** De lo descrito se deduce que la distribución de la amplitud de cada punto de la traza tiene una distribución Rayleigh. Sin embargo, debido a la influencia del coeficiente de atenuación α , los puntos de la traza tienden a tener cada vez menor magnitud a medida que el pulso incidente se propaga [22].

Por este motivo se agregó una traza extra en la cual las pérdidas se eliminaron gracias al factor de escalamiento para la constante de atenuación α que se introdujo en el módulo propagador (ver sección 3.3.3). De esta forma, en esta nueva medición se tiene una distribución Rayleigh para toda la traza.

¹⁰Como se explico en la sección 3.3.4, la semilla aleatoria sirve para poder reproducir los mismos resultados aleatorios en base a este número.

- Fase:** Al igual que con la amplitud, la fase está conformada por una parte determinista dada por la propagación del campo eléctrico incidente y una parte aleatoria dada por la variable $\Lambda(p)$ estudiada en la ecuación 56 en la sección 3.3.6. Sin embargo, a diferencia de la amplitud, para la fase no existe ninguna influencia asociada a la constante de atenuación α . Por lo tanto, la fase tiene el aspecto de una caminata aleatoria en un rango de $-\pi$ a π [57]. Si la fase se desenvuelve en el rango en cuestión, entonces se tiene una caminata aleatoria en todo el dominio real. Esta caminata aleatoria no sigue una tendencia basada en la parte determinista, pues la parte aleatoria regida por la variable aleatoria $\Lambda(p)$ tiene una magnitud lo suficientemente alta como para dominar por sobre la parte determinista, esto es explicado en profundidad en la sección 3.3.6.
- Distribución de la fase:** Del comportamiento de la fase descrito en el punto anterior se deduce que la distribución de la fase de todos los puntos obtenidos sigue una distribución uniforme en un rango de $-\pi$ a π [57].

Para simular el sistema, se utilizan las funciones creadas para conseguir las trazas correspondientes. Se grafica la magnitud de la traza, la fase de la traza, la fase desenvuelta de la traza, histogramas de magnitud y fase, y por último, se grafica la intensidad de la luz a una centésima parte de la máxima frecuencia de muestreo, es decir, a una frecuencia de 1.013 MHz, esto para demostrar las capacidades de down-sampling del simulador. Por ultimo se incluye un histograma de los campos recibidos con las perdidas anuladas para visualizar mejor el efecto de la distribución Rayleigh.

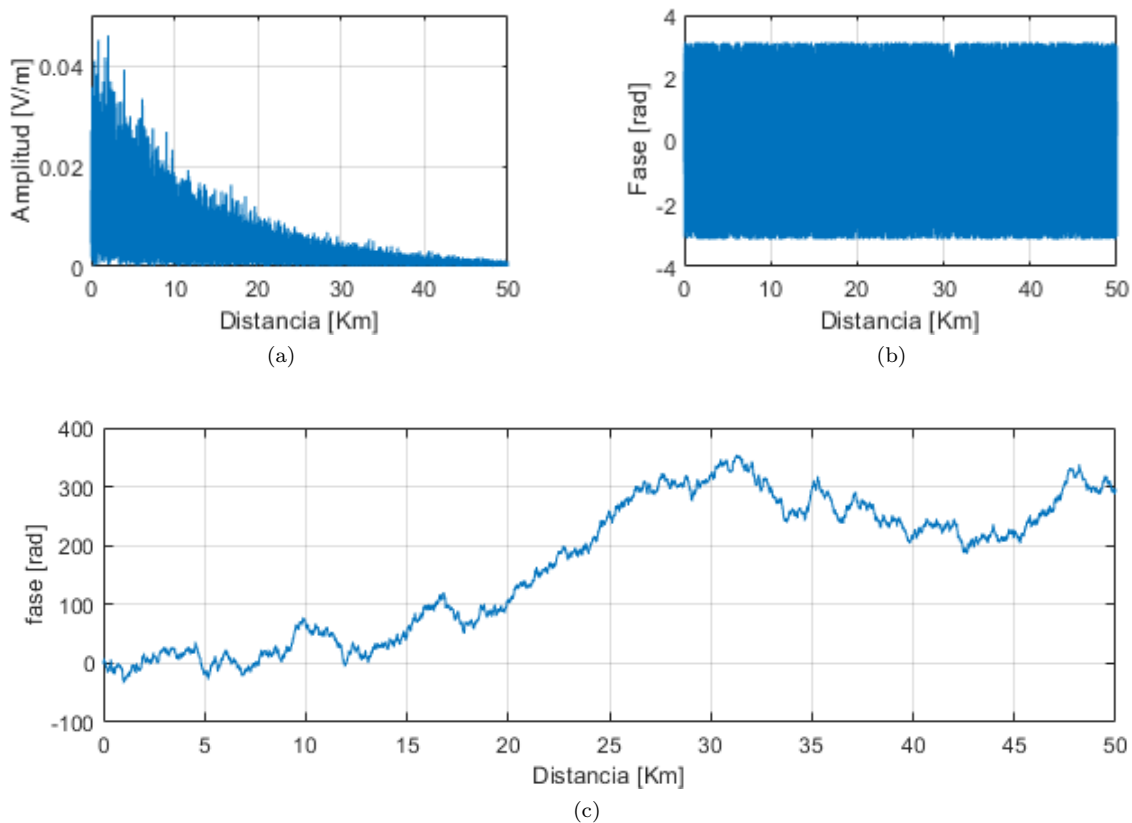


Figura 48: Traza Phase Sensitive OTDR simulada. (a) Magnitud de la traza. (b) Fase de la traza. (c) Fase de la traza desenvuelta

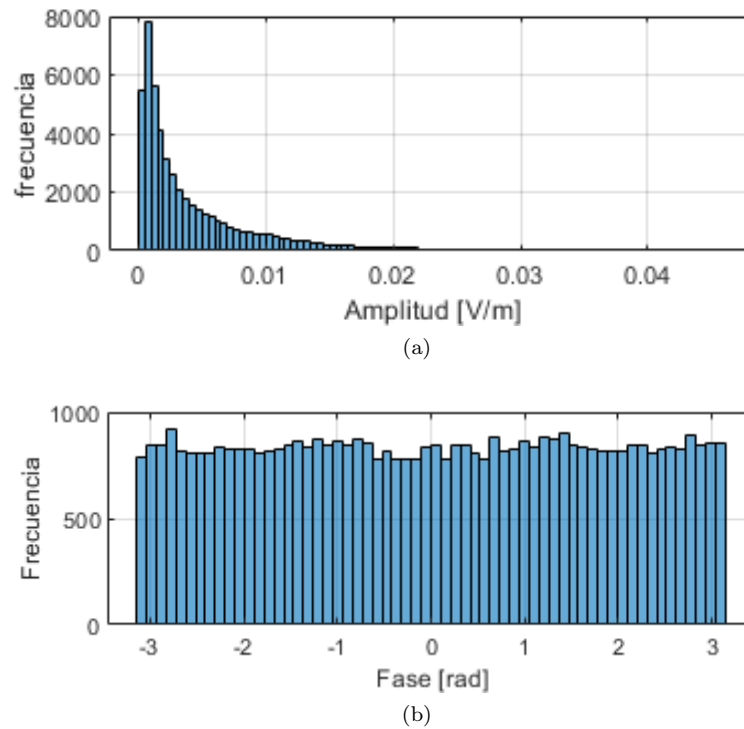


Figura 49: Histograma de las trazas Phase Sensitive OTDR. (a) Histograma de magnitud de la traza. (b) Histograma de fase de la traza

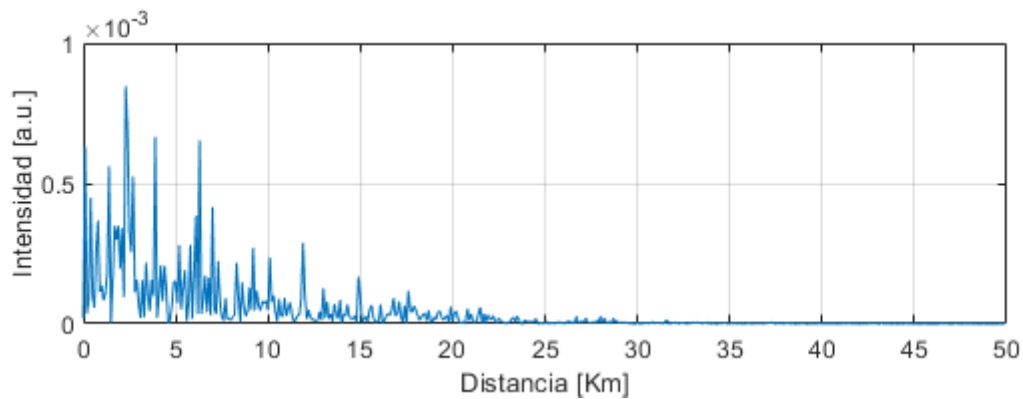


Figura 50: Intensidad con un muestreo de 2.0263 MHz

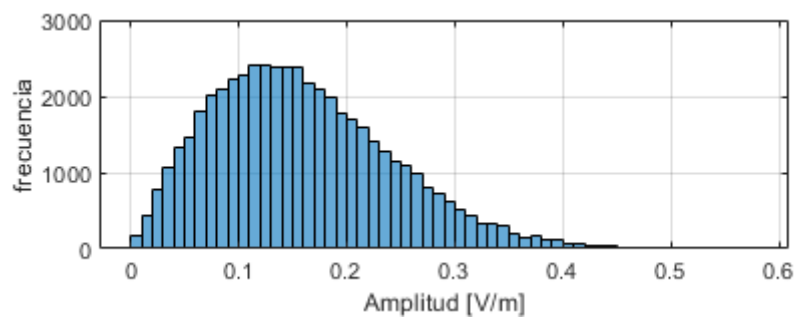


Figura 51: Histograma de magnitud del campo eléctrico para una propagación sin pérdidas

De las figuras 48 (a) y (b), se comprueba que la magnitud de la traza tiene un comportamiento aleatorio descendente; por otro lado, la fase se encuentra limitada entre $-\pi$ y π . Sin embargo, es difícil analizar la fase envuelta. Al

desenvolverla, se puede observar de manera más sencilla cómo está representada una caminata aleatoria sin ningún tipo de tendencia particular.

De la figura 49 (a) y (b), se observa que las distribuciones de las magnitud y las fases de los puntos de la traza siguen una tendencia Rayleigh y uniforme entre $-\pi$ a π , respectivamente.

En la figura 49 (a) se observa que el histograma representa una distribución Rayleigh modificada, con magnitudes mucho menores comparada a la figura 51.

Finalmente, en la figura 50, se observa que la traza de intensidad tiene un comportamiento altamente parecido al observado en la realidad, pudiendo comparar esta figura con la figura 18.

De esta manera, se concluye que los comportamientos son los esperados para el sistema Phase Sensitive OTDR. Además de esto, se puede determinar que la simulación de la traza Phase Sensitive OTDR es coherente con observaciones reales realizadas, como la observada en la figura 18 en la sección 2.4.

Finalmente, debido a todo lo anterior, es correcto deducir que la generación de trazas Phase Sensitive OTDR se encuentra dentro de lo físicamente esperado y correcto, lo que valida el módulo como simulador.

3.4.5. Funcionamiento del sistema DAS y DTS

Finalmente el único comportamiento relevante que requiere de una validación es el efecto de las perturbaciones ambientales sobre dicha traza y la capacidad de recuperar dichas perturbaciones. En esta última subsección se simularán todos los fenómenos producidos por la perturbación de la variación de fase por temperatura y tensión, el paso a paso del proceso de recuperación de índice de refracción y la recuperación de las perturbaciones originales.

Para esta sección se hará uso de todos los parámetros utilizados en la sección 3.4.4.

Los parámetros termo-ópticos son los siguientes:

- $\gamma_T = 3,12 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-1}$
- $\eta_T = 1,72 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-1}$

Los parámetros tenso-ópticos son los siguientes:

- $\mu_T = 0,17$
- $p_{11} = 0,121$
- $p_{12} = 0,27$

Para calcular las fases acumuladas hay que multiplicar por dos las fases de las ecuaciones 53 y 54, pues en este caso, la fase se ve afectada dos veces, una vez en la propagación del campo eléctrico incidente, y una segunda cuando el campo de backscattering se propaga en dirección al inicio de la fibra.

Para esta simulación se simulan dos perturbaciones estáticas sobre la fibra:

Perturbación	Variación	Rango	$\Delta\Phi$	$\Delta\bar{n}$
Térmica	3 K	23 Km a 27 Km	-0.5513 rad	$1,6999 \cdot 10^{-11}$
Tensorial	0.6 nε	38 Km a 39 Km	-5.5954 rad	$6,9016 \cdot 10^{-10}$
Total	-	-	-6.1466 rad	-

Cuadro 2: Variaciones en la propagación producidas por perturbaciones ambientales sobre la fibra óptica

Para esta prueba se mostrarán tres partes del proceso de recuperación de la perturbación original.

- **Fases desenvueltas:** En la sección 3.3.6 se demostró que las fases desenvueltas se componen de dos caminatas aleatorias. Sin embargo, dado que la aleatoriedad proviene de las propiedades físicas de la fibra, ambas tienen comportamientos iguales en los puntos no perturbados.

Por otro lado, los puntos perturbados de la fibra óptica añaden retraso o adelanto de fase; dicha variación afecta a todos los puntos posteriores en la propagación, esto puede observarse en las ecuaciones 34 y 43 que describen la propagación del campo eléctrico de backscattering, esto causa que la traza perturbada se separe de la traza de referencia de manera lineal en los puntos de las perturbaciones, generando un "off-set" entre la fase de referencia y la fase perturbada para todos los puntos de la traza posteriores a las perturbaciones asociados al retardo o adelanto causado por la perturbación.

- **Resta de fases desenvueltas:** De la ecuación 55, se deduce que la resta es:

$$\Delta\Phi(p) = -2\Delta\beta L_{\text{seg}}p - \Delta\Lambda(p) \quad (66)$$

Donde β es la constante de fase, $\Delta\Lambda(p)$ es la variable aleatoria definida en la ecuación 60, y p es la posición discreta.

De la ecuación 66 se deduce que en los puntos en los cuales existe una variación de fase y, equivalentemente, una variación del índice de refracción y de la constante de fase, existe una pendiente asociada a las perturbaciones, y sobre la pendiente, variaciones asociadas a la variable $\Delta\Lambda(p)$.

Es decir, se tiene una curva similar a las obtenidas en las figuras 43 (c), (d), 44 (c), (d), y 45 (c), con la diferencia de que incluyen variaciones aleatorias.

- **Variación del índice de refracción:** De la curva $\Delta\{\text{dif}\Phi(p)\}$ es posible obtener aproximadamente el valor de \bar{n} ; sin embargo, la curva tiene un alto nivel de incertidumbre debido a las variaciones causadas por la variable aleatoria $\Delta\Phi(p)$, discutidas en la sección 3.3.6.

$\Delta\text{dif}\{\Phi(p)\}$ se puede expresar como:

$$\Delta\text{dif}\{\Phi(p)\} = \text{dif}\{\Phi(p)\} - \text{dif}\{\Phi(p + G_L)\} \quad (67)$$

Donde $\text{dif}\Phi(p)$ está definido en la sección 3.3.6.

Considerando la misma traza pero G_L posiciones discretas más adelante:

$$\Delta\text{dif}\{\Phi(p + G_L)\} = \text{dif}\{\Phi(p + G_L)\} - \text{dif}\{\Phi(p + 2G_L)\} \quad (68)$$

Se puede observar cómo el término $\text{dif}\{\Phi(p + G_L)\}$ que resta en la ecuación 67, está sumando en la ecuación 68. Este patrón se repite para toda la traza. Esto significa que si en alguna posición discreta p la función $\text{dif}\{\Phi(p + G_L)\}$ posee una gran amplitud debido a la variable $\Lambda(p)$, entonces en G_L puntos más adelante existirá la misma amplitud pero invertida. Esto permite que al calcular un promedio de suficientes términos (que contengan puntos separados por una distancia de G_L) los efectos de las grandes variaciones causadas por $\Lambda(p)$ son atenuados.

Finalmente, después de filtrar la curva, se obtienen curvas que oscilan de manera muy cercana a los valores previstos por la tabla 2.

Para realizar esta simulación, se ingresan todos los parámetros, luego se fija la primera traza Rayleigh, se aplican las perturbaciones térmicas y tensoriales, finalmente se calculan las curvas que se van a evaluar.

En las figuras 52, 53, 54 y 55; se muestran los resultados obtenidos de la simulación realizada.

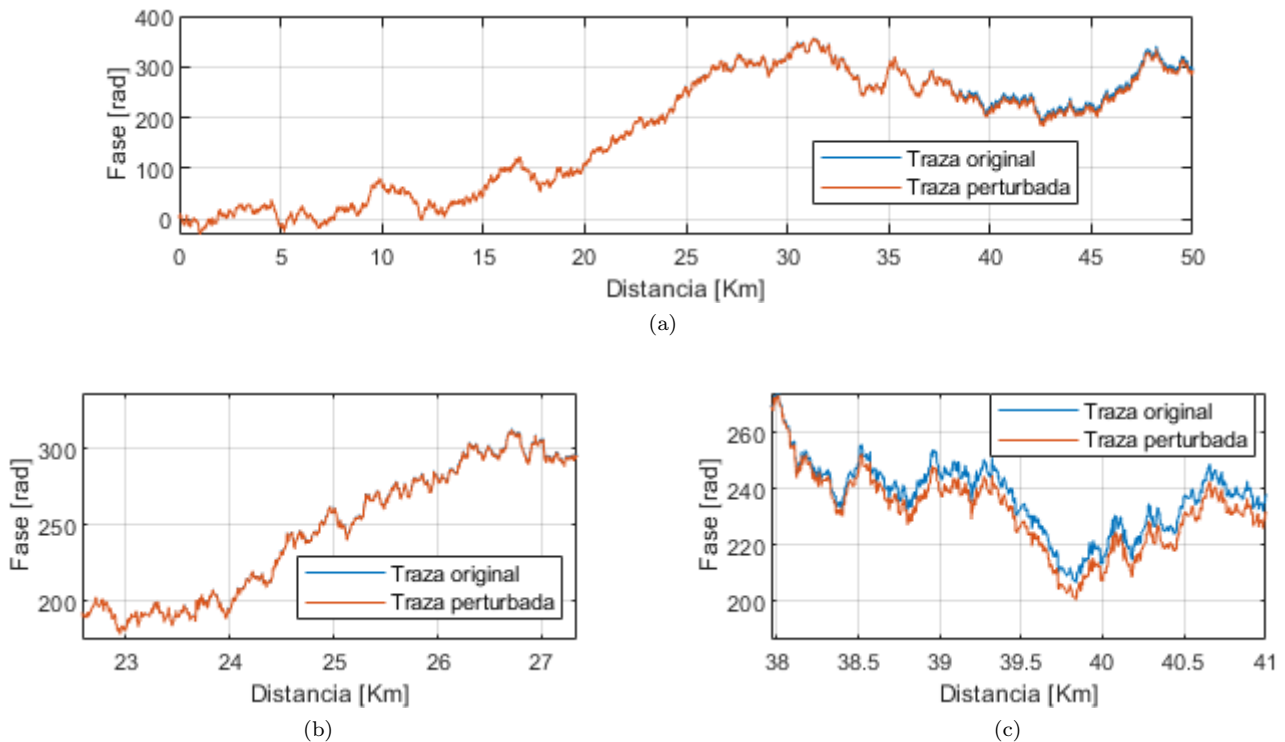


Figura 52: Fases desenvueltas de trazas Phase sensitive OTDR con perturbaciones. (a) Trazas desenvueltas completa. (b) Trazas desenvueltas en la perturbación térmica. (c) Trazas desenvueltas en la perturbación tensorial.

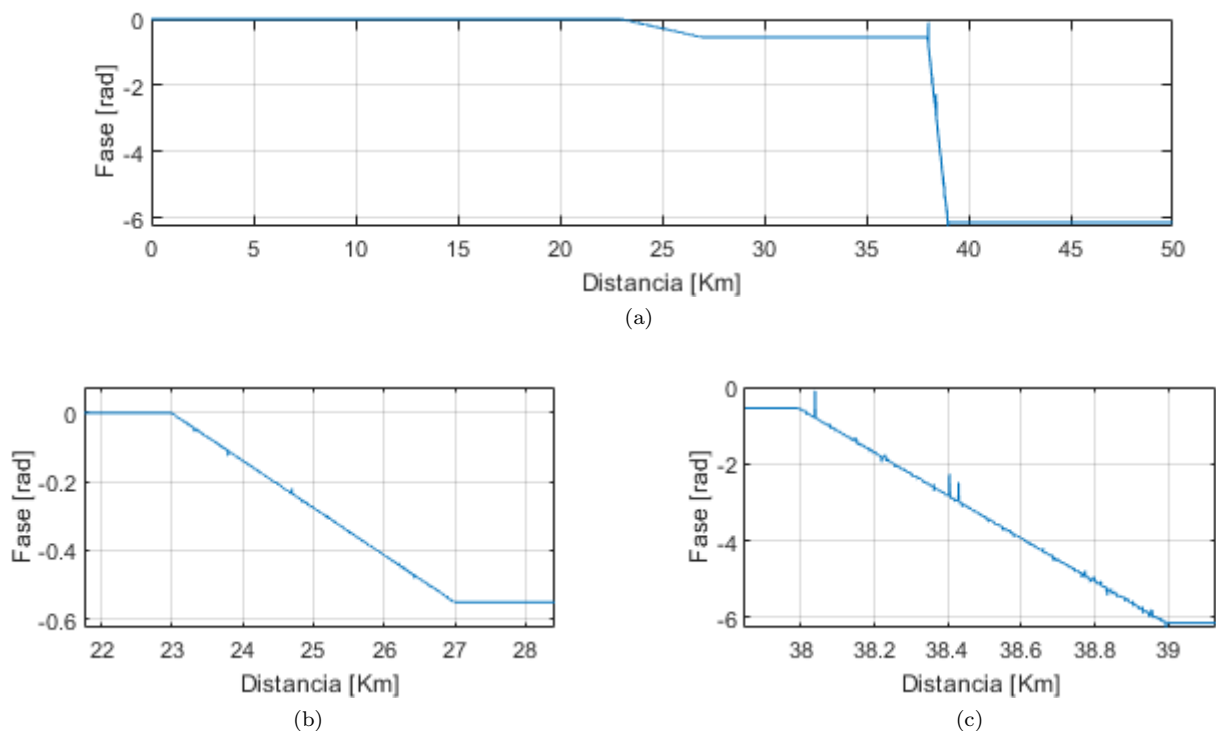


Figura 53: Resta de trazas desenvueltas con perturbaciones. (a) Resta de trazas desenvueltas. (b) Resta de trazas desenvueltas en la perturbación térmica. (c) Resta de trazas desenvueltas en la perturbación tensorial.

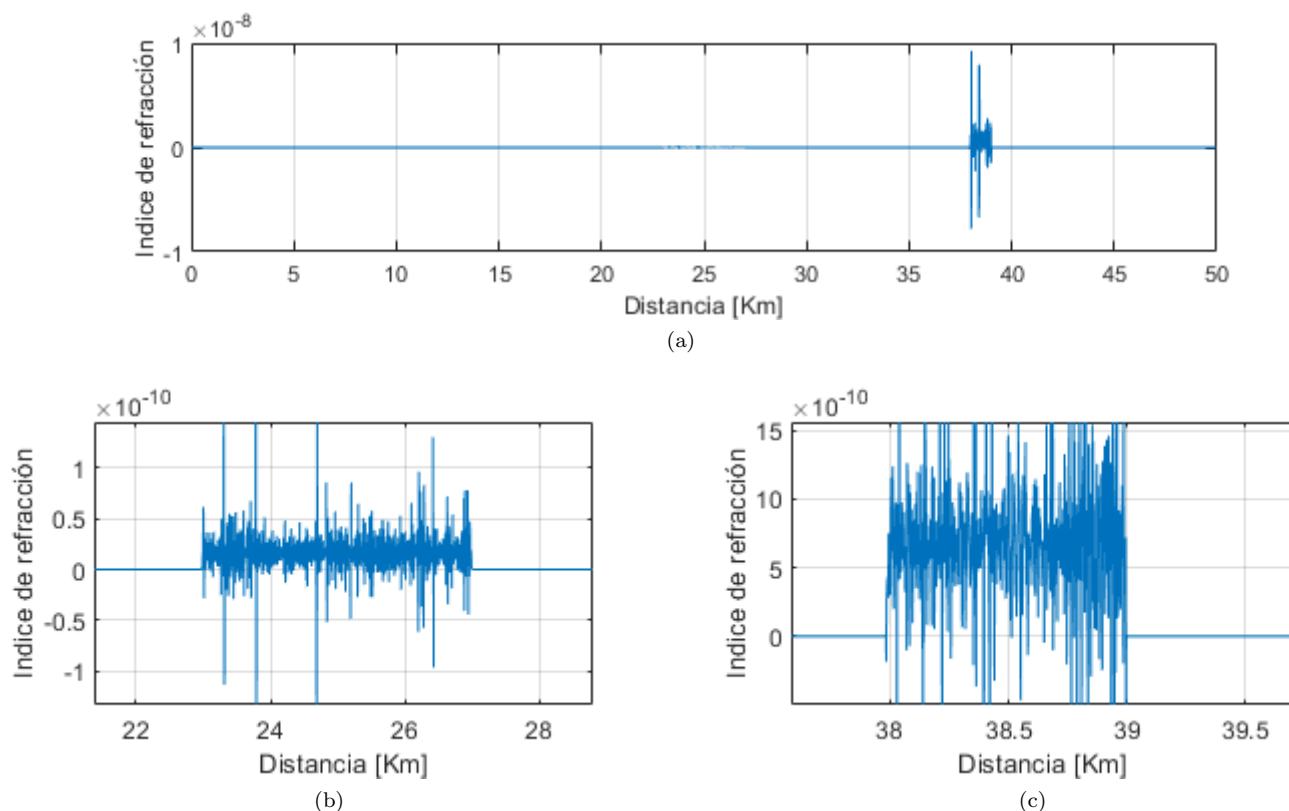


Figura 54: Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR sin filtrar. (a) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR. (b) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación térmica. (c) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación tensorial.

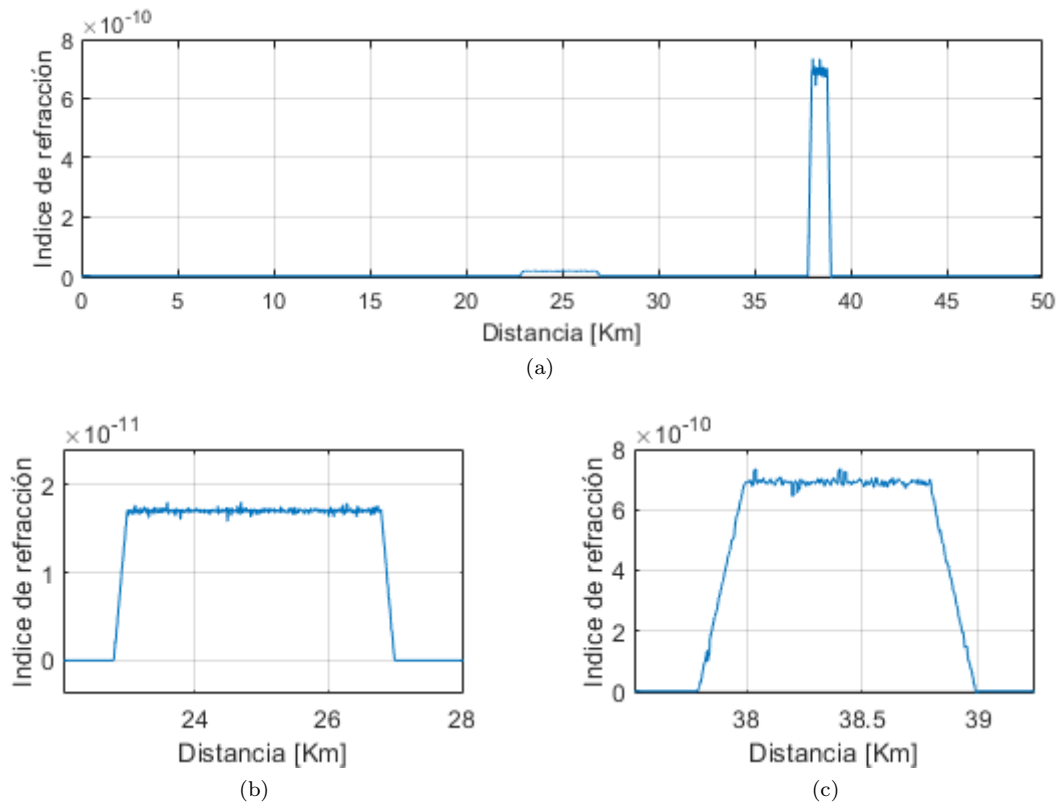


Figura 55: Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR filtrado. (a) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR. (b) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación térmica. (c) Recuperación de Δn a partir de traza Phase Sensitive OTDR en la perturbación tensorial.

De la figura 52 (a) se ve el efecto completo de la variación de fase, la cual se compone de la variación térmica y tensorial. Al analizar la fase modificada, se puede ver cómo sigue el mismo patrón de la traza original; sin embargo, esta termina alejándose. En la figura 52 (b), se ve la variación térmica, la cual tiene una magnitud muy pequeña. Sin embargo, si se analiza el inicio de dicha figura y se compara con el final, es posible percibir cómo aparece el desfase asociado al cambio térmico, desplazando finalmente la traza¹¹. En la figura 52 (c), se ve la variación de fase asociada a la perturbación tensorial. En este caso, es posible observar con mayor claridad cómo se separan las fases desenvueltas en el zona de la perturbación tensorial. En la figura 52 (a), se ve que al final de la traza existe un retraso en la fase asociado tanto a la perturbación térmica y tensorial.

En la figura 53 (a), se ve el resultado de restar las fases desenvueltas de la figura 52 (a). Se observan las pendientes descendientes que fueron descritas por la ecuación 66. Además, se ve la diferencia de magnitud en el cambio de fase entre la variación térmica y tensorial, en donde la segunda es mucho mayor, tal como está descrito en la tabla 2. En la figura 53 (a) se pueden observar los puntos en los cuales parten las perturbaciones. Es importante destacar que se realizó una simulación sin ruido. En la realidad, no se podría esperar tener ese nivel de precisión, pues existiría ruido tanto en la adquisición de la traza original como modificada, lo que haría que no fuera tan evidente identificar el punto de inicio de la perturbación, esto se estudia a mayor profundidad en la sección 4.1.

En la figura 53 (b), se observa la pendiente asociada a la variación de temperatura. Dicha pendiente tiene en general un comportamiento descendente como el esperado. La fase acumulada en todo el segmento perturbado es aproximadamente igual a los cálculos rotulados en la tabla 2. Esto se repite con la figura 53 (c). Además, tanto en la figura 53 (b) como (c), se observan variaciones sobre la recta. Estas son las variaciones esperadas debido a la variable aleatoria $\Delta\Lambda(p)$. Las variaciones de fase de la figura 53 (c), tienen mayor magnitud que las de la figura 53 (b), tal como está descrito en la tabla 2

En las figuras 54 y 55, se observa la curva $\Delta dif\{\Phi\}$, es decir, dichos gráficos muestran el valor aproximado de $\Delta\bar{n}$. En las figuras 54 (b) y (c), se ve el efecto que tienen las variaciones de $\Delta\Lambda(p)$ para el cálculo de $\Delta\bar{n}$, haciendo que sea difícil determinar una variación del índice de refracción específico. Sin embargo, en ambos casos se ve que los resultados obtenidos oscilan cerca de los valores descritos en la tabla 2.

En la figura 56 se observan algunas simetrías a una distancia de G_L , indicadas con parejas de flechas del mismo color para identificar los términos complementarios. Por lo mismo, en la figura 55, al utilizar un filtrado con media móvil de mayor rango que el gauge length, se cancelan, obteniendo resultados más cercanos a los esperados en la tabla

¹¹La variación es muy pequeña y dependiendo del modo de visualización de este documento, puede no verse.

2.

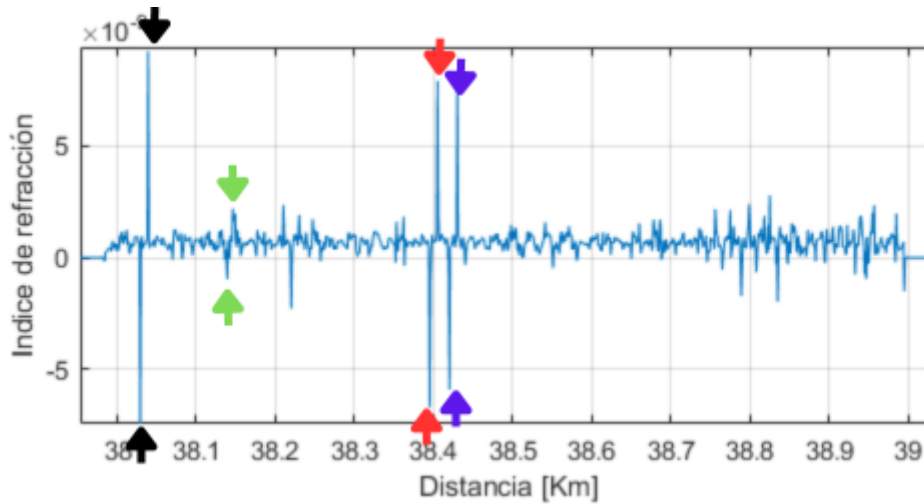


Figura 56: Análisis de la simetría de las variaciones en las trazas Phase Sensitive OTDR.

Al incluir un filtro pasa bajos, es inevitable la aparición de una pendiente asociada a la transición entre la zona sin perturbación y la zona perturbada.

Es posible deducir el valor de Δn de la figura 54 y calcular con las ecuaciones 53 y 54 el valor de la variación de temperatura y tensión. Sin embargo, para realizar este último cálculo, hace falta contexto para saber si la variación del índice de refracción ocurrió por una variación térmica o una variación tensorial. Para este caso particular, dicha información se asume conocida.

En la figura 57, se puede observar la recuperación de la perturbación térmica y tensorial, la cual se llevo a cabo por medio de las ecuaciones 53 y 54, las cuales describen la relación entre la variación del índice de refracción y las perturbaciones térmicas y tensoriales. De esta forma, al realizar la transformación, se recuperan perturbaciones de temperatura y tensión muy similares a las descritas en la tabla 2.

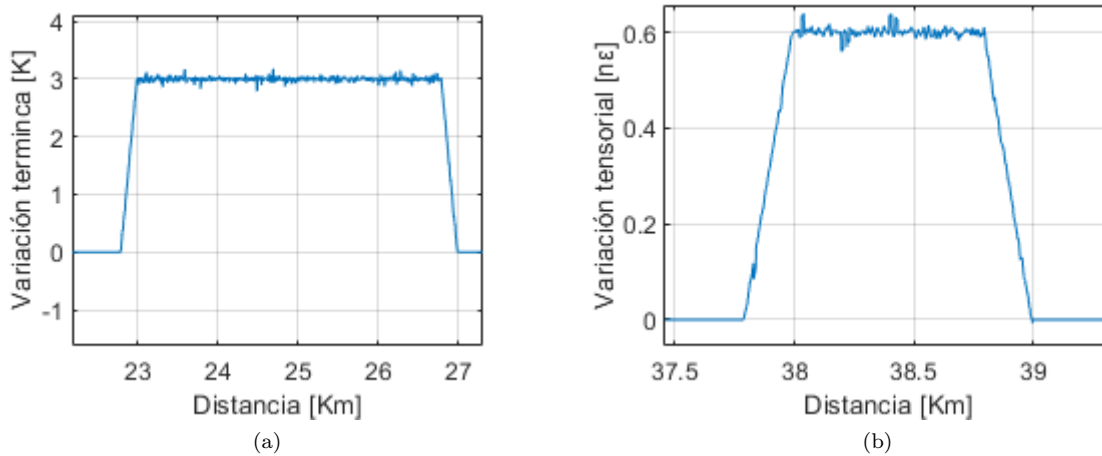


Figura 57: Recuperación de variaciones de temperatura y tensión a partir de trazas Phase Sensitive OTDR. (a) Recuperación de la variación de temperatura a partir de una traza Phase Sensitive OTDR. (b) Recuperación de la variación de tensión a partir de una traza Phase Sensitive OTDR.

Finalmente, se concluye que los resultados son acertados con lo esperado. Por lo cual, se puede considerar que el simulador DAS y DTS diseñado es válido para recuperar las variaciones de temperatura y tensión. De la misma manera, se explicó el origen de las variaciones aleatorias dentro de las trazas mostradas.

3.4.6. Análisis final

Del análisis realizado en esta sección, se puede deducir que el simulador y todos sus componentes quedan correctamente validados, de manera que todos ellos pueden reflejar de manera fidedigna la realidad. A partir de ellos, se pueden

realizar distintas pruebas y simulaciones con la intención de probar modelos de recuperación de fase, algoritmos de desenvolvimiento y cualquier otro sistema que se considere pertinente.

3.5. Limitaciones del simulador

El simulador por su naturaleza cuenta con una serie de restricciones de uso para que las aproximaciones sean válidas. En esta sección se revisarán detalladamente cuáles son todas esas restricciones y cuáles son las consecuencias que tienen.

3.5.1. Largo de los segmentos de fibra óptica

Uno de los parámetros asociados a una aproximación que contiene la mayor cantidad de consecuencias dentro del simulador es el tamaño de los segmentos de fibra óptica L_{seg} . Dichas consecuencias se han expuesto a lo largo de esta memoria, pero se recopilan aquí:

- **Efectos sobre la frecuencia de muestreo:** La frecuencia de muestreo es limitada por el tamaño del segmento, la cual viene dada por $f_s = \frac{V_p}{2L_{\text{seg}}m}$, donde m es un número natural, V_p es la velocidad de propagación de la luz y L_{seg} es el largo del segmento de fibra óptica. Dado que m es un divisor, la selección de frecuencias de muestreo posibles resulta limitada. Al seleccionar un valor para L_{seg} , es importante tener en cuenta de antemano cuál es la frecuencia de muestreo deseada y escoger un L_{seg} que permita seleccionar dicha frecuencia de manera exacta.
- **Tiempo de ejecución:** El tiempo de ejecución del algoritmo para la obtención de trazas Phase Sensitive OTDR sigue una tendencia np , donde n y p corresponden al número de segmentos de la fibra y al ancho espacial del pulso, respectivamente. Esto tiene como consecuencia que el tiempo de ejecución del algoritmo se relacione con el inverso del cuadrado de la longitud del segmento (revisar sección 3.3.4).

Pequeñas variaciones sobre el largo del segmento de fibra óptica tiene grandes consecuencias para el tiempo de ejecución, haciendo que la simulación pueda tener tiempos de ejecución no viables o poco prácticos.

Si se requiere tener un L_{seg} pequeño, es recomendable limitar el tamaño de la fibra y el ancho espacial del pulso D , para acotar los tiempos de ejecución de simulador.

- **Magnitud y longitud de las perturbaciones:** En la sección 3.3.5, se estudio de cómo los efectos de la perturbación se despreciarían para los reflectores individuales dentro de un segmento de fibra óptica. Esto es posible si la variación de fase es suficientemente pequeña dentro de dicho segmento de fibra óptica.

De las ecuaciones 36 y 37 que describen la variación de fase para perturbaciones térmicas y tensoriales, se deduce que ambas son directamente proporcionales al valor de la longitud del segmento de fibra óptica L_{seg} . De esta forma, el largo del segmento de fibra óptica debe ser lo suficientemente pequeño para que la variación de fase dentro de un mismo segmento de fibra óptica sea despreciable.

3.5.2. Fallas en el desenvolvimiento de fase

Es posible que el lector haya notado que, para la obtención de perturbaciones, se han utilizado valores de $\Delta\bar{n}$ pequeños, normalmente del orden de 10^{-9} o inferiores. Esta no es una decisión arbitraria; uno de los pasos más importantes para la recuperación de la variación del índice de refracción es el desenvolvimiento de la fase. Para la implementación de este simulador, se ha utilizado la función interna de MATLAB `unwrap` [69], la cual, como cualquier otro algoritmo de desenvolvimiento, es sensible a las variaciones producidas por variables aleatorias [52], como la variable $\Lambda(p)$ descrita en la sección 3.3.6. Esto limita la magnitud de perturbaciones térmicas y tensoriales.

Las figuras 58 (a) y (b) se producen al aplicar una variación del índice de refracción equivalente a 10^{-10} desde los 10 a 30 km.

En la figura 58 (a) se puede observar el desenvolvimiento de fase de una traza perturbada y otra sin perturbación. En este desenvolvimiento, existe un error de desenvolvimiento entre los 14.25 y 14.3 km. Este error se evidencia como una diferencia en la forma de las curvas. La curva roja punteada representa el resultado que se debería haber obtenido al desenvolver, mientras que la línea roja sólida representa el desenvolvimiento obtenido. Esto finalmente provoca que toda la traza que le sigue se desplace de manera no prevista y no refleje realmente la variación de fase.

Debido a que las fallas de desenvolvimiento causan grandes diferencias de fase entre puntos contiguos, la curva del índice de refracción \bar{n} aproximado presenta grandes variaciones asociadas a las fallas en el desenvolvimiento. En la figura 58 (b) se observan dichos efectos.

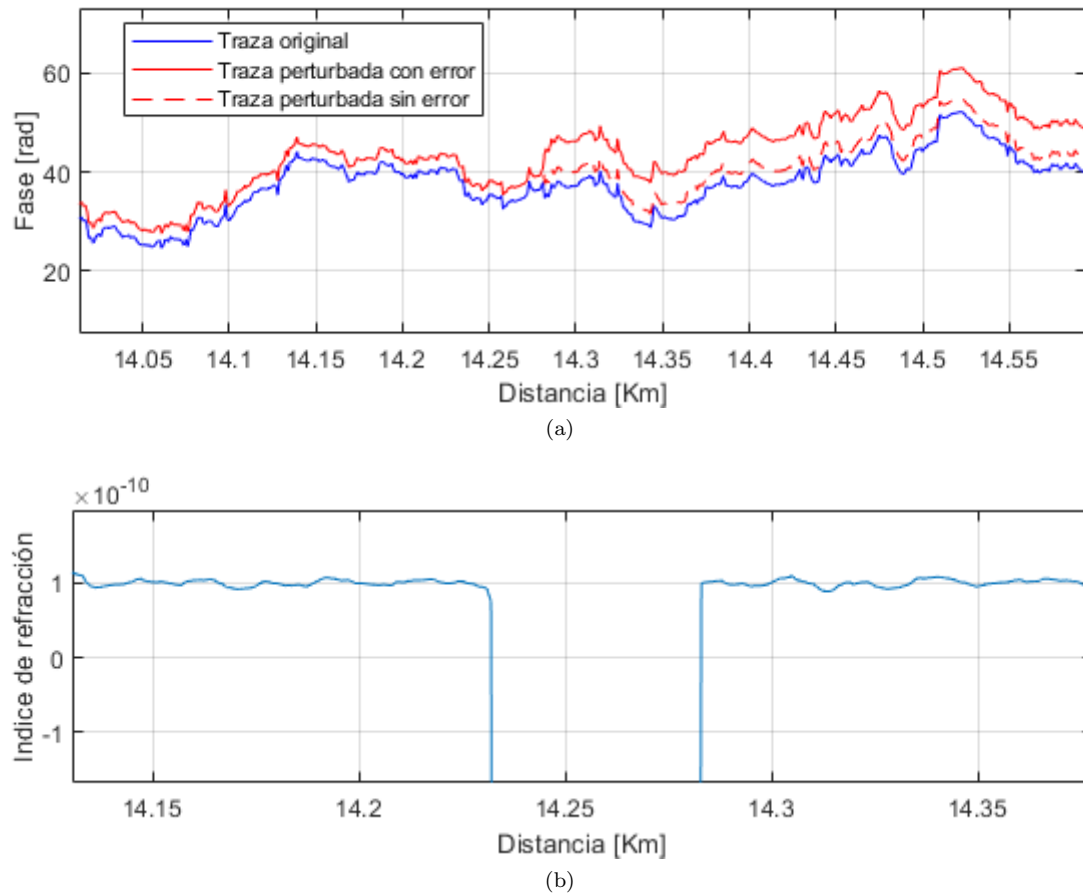


Figura 58: Falla del desenvolvimiento de fase en la recuperación de $\Delta\bar{n}$. (a) Falla en el desenvolvimiento de fase (b) Falla en la recuperación de variación de índice de refracción con variación de 10^{-10}

Por lo tanto, mientras más fallas de desenvolvimiento existan en las trazas, más discontinuidades habrá en la curva del índice de refracción aproximado $\Delta\bar{n}$. Esto dificulta la lectura de dicha curva, ya que añade cada vez más variaciones de alta magnitud.

De acuerdo con lo estudiado en la sección 2.6.2.1, los algoritmos de desenvolvimiento fallan cuando las variaciones de fase son muy altas como para poder interpretar de buena manera su continuidad [47]. Por lo tanto, mientras mayor sea el valor de la variación de $\Delta\bar{n}$, existirán más cantidades de fallas de desenvolvimiento, pues el valor de $\Delta\bar{n}$ se relaciona directamente con el valor de la variación de fase.

En las figuras 59 (a), (b) y (c) se observa el efecto de introducir variaciones del índice de refracción cada vez mayores. En la figura 59 (a) se ve una mayor cantidad de fallas de desenvolvimiento; sin embargo, se puede determinar que el valor de la variación del índice de refracción es de $10 \cdot 10^{-10}$ aproximadamente, valor que corresponde con el introducido en la simulación.

Por otro lado, en la figura 59 (b), las variaciones asociadas a las fallas de desenvolvimiento son abundantes en toda la traza; sin embargo, aún es posible determinar que la variación del índice de refracción es de 10^{-8} , valor que es acertado con lo simulado.

Finalmente, en la figura 59 (c) la curva no oscila ningún valor distinto de cero, ni sigue ningún tipo de tendencia en el espacio donde existen perturbaciones, tiene un comportamiento completamente aleatorio; por lo tanto, no es posible determinar el valor de la variación de índice de refracción simulado, el cual tiene un valor de 10^{-7} . Esto se debe a que las fallas de desenvolvimiento son tan abundantes que las trazas de las fases desenvueltas **no son comparables, ya que no presentan ningún tipo de similitud.**

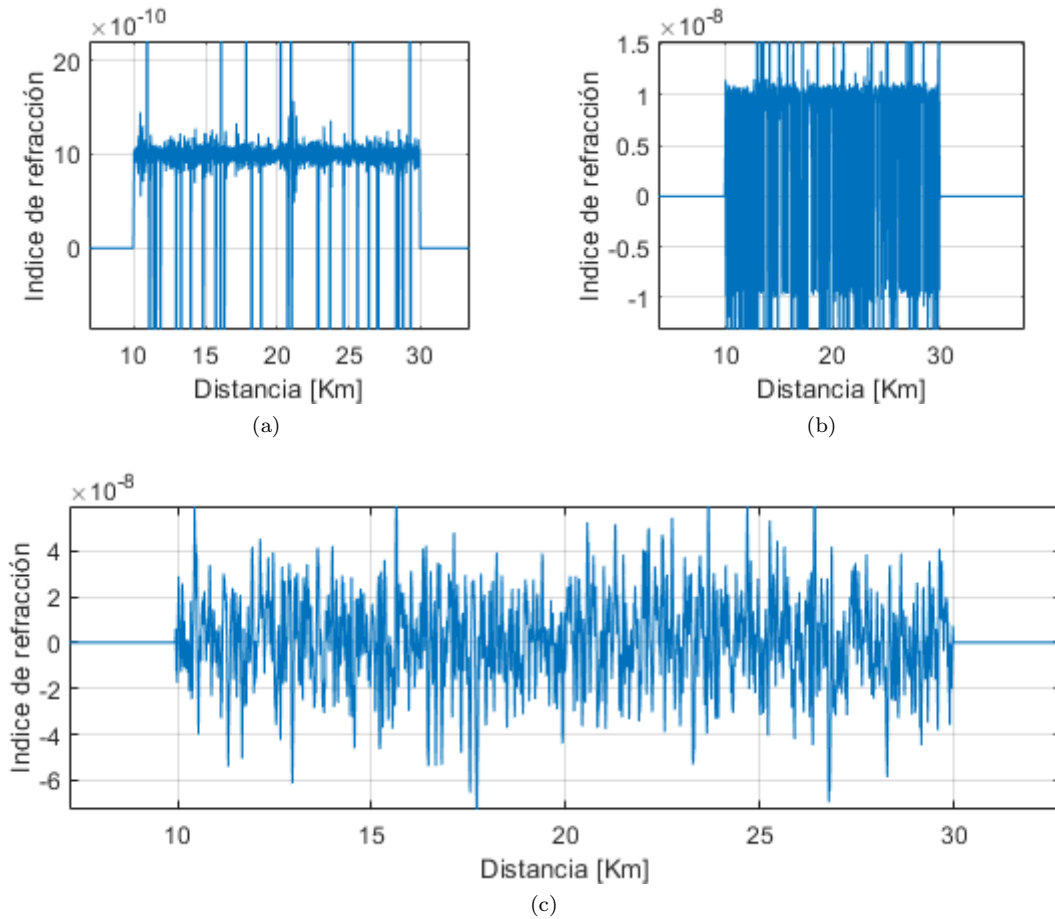


Figura 59: Diferentes recuperaciones de $\Delta\bar{n}$ con fallas en el desenvolvimiento. (a) Variación de 10^{-9} . (b) Variación de 10^{-8} . (c) Variación de 10^{-7}

Como las variaciones del índice de refracción están directamente relacionadas con las perturbaciones tensoriales y térmicas (ver sección 2.5.2), esto termina por limitar la magnitud de las perturbaciones que se pueden simular.

Sin embargo, es posible contrarrestar el efecto de las fallas de desenvolvimiento, pues, como se estudió en la sección 2.6.2.1, para evitar fallas de desenvolvimiento se debe aumentar la frecuencia de muestreo f_s . De la ecuación 49 se deduce que esto se logra disminuyendo el largo del segmento L_{seg} . Sin embargo, como se explicó en la sección 3.5.1, esto puede tener grandes consecuencias para los tiempos de ejecución de la simulación.

De esta forma, es posible concluir que las perturbaciones térmicas y tensoriales deben tener una magnitud suficientemente acotada como para no producir fallas en el desenvolvimiento de fase.

3.5.3. Limitación en el emisor

El módulo emisor se diseñó con un ancho espectral de cero. Esto en sí mismo no es realista, ya que no existe un emisor con esas características. Esta idea se justifica explicando que un emisor real puede ser construido a partir de varios módulos emisores; sin embargo, esto tiene sus límites.

Si se trata de construir un emisor de ancho espectral largo, se van a producir una gran cantidad de campos eléctricos de backscattering, cada uno de los cuales se caracteriza por una variable gaussiana circular de media cero. De esta manera, si sumamos muchos de estos campos, la suma también tendrá una distribución gaussiana de media cero circular [53]. Esto es contradictorio con la realidad, ya que la técnica OTDR no phase sensitive hace uso de emisores de ancho espectral largos, obteniendo campos de backscattering que se comportan de manera determinista, no probabilista.

El motivo por el cual ocurre esta discrepancia con la realidad, es la **simplificación de los reflectores acumulados**. Se ha asumido que el campo eléctrico de backscattering tiene una distribución gaussiana circular de media cero, algo trivial de demostrar y que se ha observado [22], y es a partir de esta afirmación que se diseñó el simulador. Sin embargo, esto es solamente válido si el ancho espectral es bajo.

Es decir, en el momento en el cual se sale de este régimen, esta asunción dejará de ser correcta. **Por lo tanto, no es posible simular un emisor de ancho espectral alto en el simulador diseñado.**

4. Simulaciones realizadas

Esta memoria explica los fenómenos físicos en los cuales se fundamenta el simulador, siendo estos: la dispersión de Rayleigh, la teoría de propagación de campos electromagnéticos en fibra óptica, la generación de campos de backscattering y el funcionamiento de sistemas phase sensitive OTDR (capítulo 2). Se explica el diseño e implementación del simulador (capítulo 3). Se ha expuesto, demostrado y validado el funcionamiento de cada componente del simulador (sección 3.4).

No obstante, no se ha explorado las capacidades de este simulador. En este capítulo, se recopilan una serie de simulaciones con el objetivo de mostrar casos de uso normales para el simulador.

La primera simulación consiste en observar la influencia del ruido óptico simulado en las mediciones. Para el resto de las mediciones en esta sección, el ruido óptico está siempre activo.

Para todas las simulaciones realizadas se utilizan los siguientes parámetros.

Datos de la fibra:

- Índice de refracción del núcleo: $n_1 = 1,5$
- Índice de refracción del revestimiento: $n_2 = 1,46$
- Radio del núcleo: $a = 1,7\mu\text{m}$
- Largo del segmento de la fibra óptica: $L_{seg} = 1 \text{ m}$

Datos del emisor:

- Longitud de onda de la luz emitida: $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$.
- Campo eléctrico emitido: $E_0 = 2 \text{ V/m}$
- Duración (temporal) del pulso: $\tau_d = 100 \text{ ns}$

Parámetros de inicialización del modulo Rayleigh.

- Semilla inicial con valor de¹² 3
- Desviación estándar de la distribución gaussiana asociada a los reflectores acumulados: $\sigma = 0,01$

Parámetros termo-ópticos:

- Coeficiente termo-óptico: $\gamma_T = 3,12 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-1}$
- Coeficiente de termo-expansión: $\eta_T = 1,72 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-1}$

Los parámetros tenso-ópticos:

- Coeficiente de poisson: $\mu_\varepsilon = 0,17$
- Coeficientes termo-tensorial: $p_{11} = 0,121$ y $p_{12} = 0,27$

Con los parámetros anteriores las propiedades propagativas de la onda son:

- Constante de atenuación: $\alpha = 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ np/m}$
- Constante de fase: $\beta = 6,002 \cdot 10^6 \text{ rad/m}$
- Velocidad de propagación: $V_p = 2,0263 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- Ancho o largo espacial del pulso: $D \approx 20 \text{ m}$
- Ancho o largo espacial del pulso en segmentos: $D_{seg} = 20 \text{ segmentos}$

El largo de la fibra y otros parámetros de interés se mencionan particularmente en cada simulación.

¹²Este valor sirve para poder reproducir los mismos comportamientos aleatorios

4.1. Efecto del ruido sobre la medición

El simulador diseñado tiene la capacidad de incluir ruido en el módulo demodulador de fase (sección 3.3.6). Este ruido se simula sumando una variable aleatoria gaussiana compleja circular al campo eléctrico de backscattering. Esta no es necesariamente la forma real en que el ruido afecta a la fase y magnitud; sin embargo, es útil para demostrar el efecto que tiene el ruido sobre la recuperación de las señales.

Se realiza una simulación con el objetivo de observar la influencia del ruido simulado. La longitud de la fibra es de 1 Km y el gauge length utilizado es de 10 metros. Para esta simulación, se introduce una única variación rectangular de 10 K sobre la fibra, desde los 450 metros hasta los 650 metros.

Debido a que se introduce únicamente una perturbación térmica, se puede asumir esto para interpretar el resultado de $\Delta\bar{n}$ como una variación de temperatura, y gracias a la ecuación 53 que relaciona la variación del índice de refracción con la variación de temperatura, se puede recuperar esta última.

El procedimiento para llevar a cabo esta simulación es el siguiente:

1. Se fija una traza de referencia.
2. Se aplica una perturbación de 10 K entre los 450 a 650 metros.
3. Se recupera el valor de $\Delta\bar{n}$ y por tanto, de la variación de temperatura, se almacena este resultado.
4. Se activa el ruido con una desviación estándar de $5 \cdot 10^{-5}$ V/m y media de 0 V/m.
5. Se recupera el valor de $\Delta\bar{n}$ y por tanto, de la variación de temperatura, se almacena este resultado.

Al terminar el proceso se tiene el resultado de ambas simulaciones, con y sin ruido.

De la figura 60 se puede observar la influencia del ruido en la recuperación de temperatura.

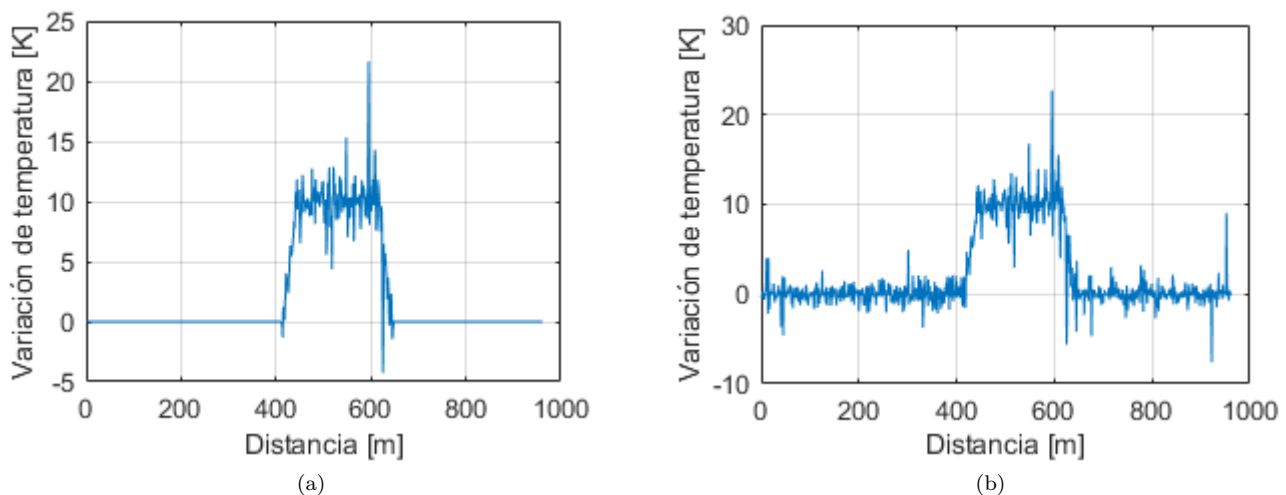


Figura 60: Efecto del ruido sobre la recuperación de temperatura. (a) Medición sin ruido de la temperatura a una distancia de 350 metros. (b) Medición con ruido de la temperatura a una distancia de 350 metros.

Tanto en la figura 60 (a) como (b), se aprecia que la señal oscila alrededor de los 10 K que se simularon. Sin embargo, en la figura 60 (b), el efecto del ruido es notable en la señal, dificultando la obtención de un valor claro para la variación de temperatura ΔT .

Por otro lado, al analizar las posiciones, se determina la distancia de inicio y final de la perturbación. En la figura 60 (a), se puede observar que la perturbación muestra sus primeros efectos a una distancia de 430 metros. Considerando que la resolución espacial $W = D/2$ tiene un valor de 10 metros (ver capítulo 2.4) y el gauge length tiene un valor de 10 metros, es posible determinar que la perturbación inicia en los 450 metros. Esto se calcula sumando el valor del gauge length y la resolución espacial a la distancia donde se ven las primeras influencias de la perturbación (ver capítulo 3.3.6). Por otro lado, se observa que la influencia de la perturbación termina en los 650 metros.

En contraste, en la figura 60 (b) es más difícil definir la distancia exacta desde donde parte la perturbación. Es posible observar que la influencia de la perturbación ocurre cerca de los 430 metros, por lo tanto, la perturbación inicia, aproximadamente, a una distancia de 450 metros y termina, aproximadamente, a una distancia de 650 metros.

De esta forma, se puede confirmar los dos principales efectos que tiene el ruido sobre las mediciones, añadiendo incertidumbre sobre el valor de la magnitud y la posición de las perturbaciones.

4.2. Efecto del ruido en mediciones a distintas distancias

En la sección anterior se trabajó el ruido sin abordar de manera específica la SNR de la señal. En un sistema óptico como el Phase Sensitive OTDR, la SNR es variable en función de la distancia de la medición, ya que mientras más distancia deba de recorrer el pulso, más se atenuará la señal de interés (campo eléctrico de backscattering) debido al efecto de coeficiente de atenuación α . Por otro lado el ruido, al estar asociado al módulo de adquisición de datos, no presentará variaciones en función de la distancia de la medición.

Debido a que en esta simulación tanto el ruido como el campo eléctrico siguen una distribución gaussiana circular (ver capítulo 3.3.6), es posible calcular el valor esperado que tiene la magnitud del campo eléctrico como [71]:

$$E[x] = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (69)$$

Donde σ es la desviación estándar de las variables gaussianas. De esta forma, la magnitud esperada de la señal de interés (campo eléctrico de backscattering) es:

$$S(p) = \sigma_s \sqrt{\frac{\pi}{2}} |E_0| e^{-2\alpha z} \quad (70)$$

Donde σ_s es la desviación estándar de los reflectores acumulados R y z es la distancia. Así, la relación SNR en el sistema Phase Sensitive OTDR está dada por [63]:

$$SNR(p) = \frac{\sigma_s}{\sigma_r} |E_0| e^{-2\alpha z} \quad (71)$$

En esta simulación se introducen 3 variaciones de temperatura en 3 posiciones diferentes de la fibra para observar el efecto de la SNR. Se utiliza una fibra de longitud de 100 km y un gauge length de 10 metros.

El ruido simulado tiene una desviación estándar de 10^{-6} V/m.

Las perturbaciones son las siguientes:

- 10 K desde los 100 hasta los 300 metros, equivalente a un SNR de 85,82 dB.
- 10 K desde los 10 km hasta los 10.3 km, equivalente a un SNR de 79,74 dB.
- 10 K desde los 60 km hasta los 60.3 km, equivalente a un SNR de 49 dB.
- 10 K desde los 80 km hasta los 80.3 km, equivalente a un SNR de 6,94 dB.

En las Figuras 61, se pueden observar los efectos del ruido en las recuperaciones de la variaciones de temperatura en diferentes posiciones.

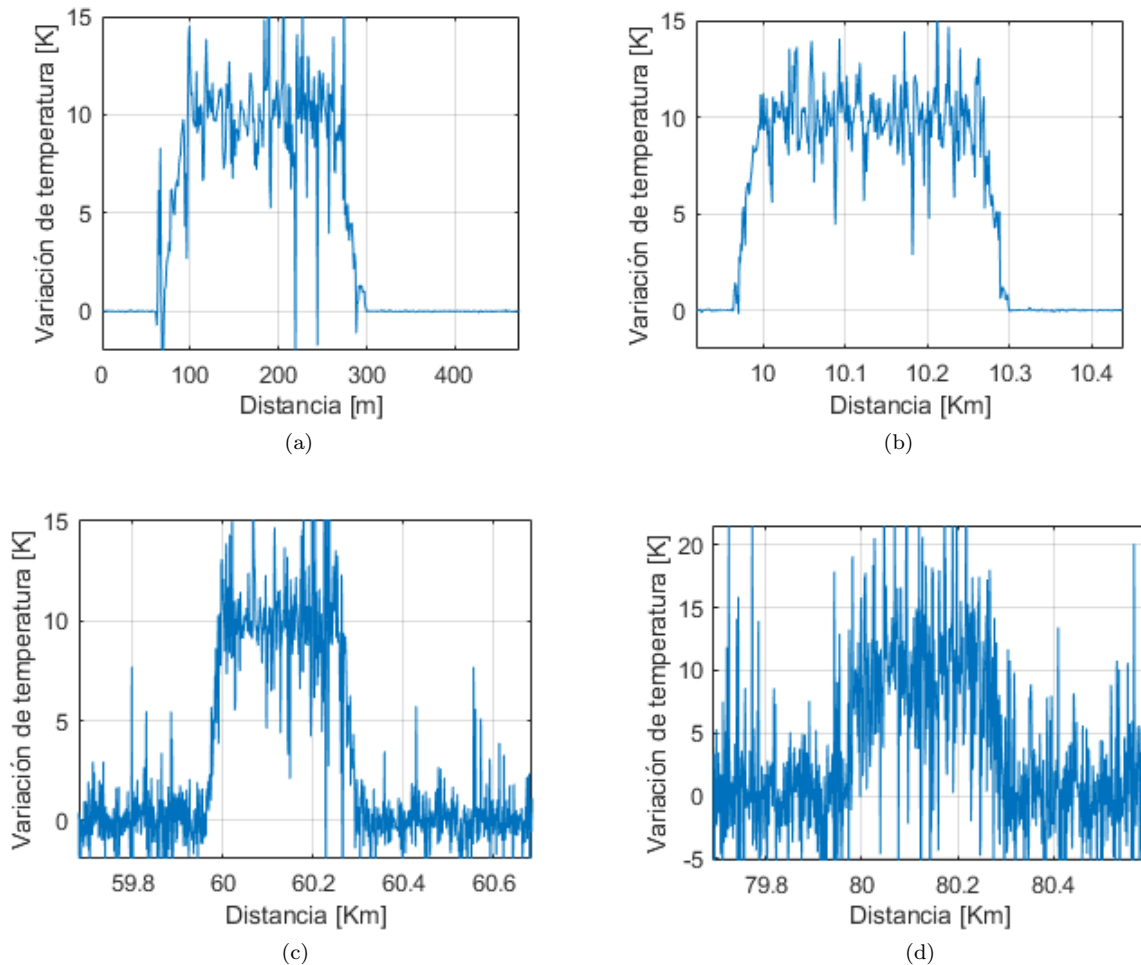


Figura 61: Variación del SNR con la distancia. (a) Medición en la primera perturbación a una distancia de 100 metros. (b) Medición en la segunda perturbación a una distancia de 10Km. (c) Medición en la tercera perturbación a una distancia de 60Km. (d) Medición en la cuarta perturbación a una distancia de 80Km

De la Figura 61 (a) se estima que la distancia en el cual inicia la influencia de la perturbación ocurre a los 70 metros y el final de la perturbación ocurre a los 306 metros, teniendo en consideración que tanto el gauge length como la resolución espacial tienen una longitud de 10 metros. Entonces, la perturbación tiene lugar, aproximadamente, entre los 90 y 306 metros.

De la Figura 61 (b), se estima que la perturbación tiene su primera influencia en una distancia de 9.983 km y termina a los 10.303 km, lo que significa que la perturbación está entre los 10.03 km y 10.303 km, aproximadamente.

De la Figura 61 (c), se puede estimar que la perturbación parte en una distancia de 60 km y termina en una distancia de 60.291 km, lo que significa que la perturbación va desde el punto 60.02 km hasta los 60.291 km.

De la figura 61 (d), se puede estimar que la perturbación parte a los 80 Km y termina aproximadamente en los 80.3 Km, no es posible indicar una posición específica debido al ruido presente.

Además, en las figuras 61 (a), (b), (c) y (d), se observa que la variación de temperatura oscila en unos 10 K.

Finalmente, se puede apreciar en las figuras 61 que al aumentar la distancia de la medición, la SNR es menor, lo que dificulta el procedimiento de interpretación de las variaciones ambientales.

4.3. Detección de perturbación estática por intensidad

Una de las decisiones de diseño en el simulador es la utilización los resultados de un sistema de adquisición de datos, sin la simulación del funcionamiento de dicho sistema (ver sección 3.3.6).

Sin embargo, en la sección 2.6.1 se estudió una metodología diferente al análisis de fase para poder detectar las posiciones de las perturbaciones pero no su naturaleza ni magnitud. Esta metodología consiste en la utilización de sistemas DVS, los cuales se basan en simplemente restar las trazas de intensidad phase sensitive OTDR después y antes de la variación. Aunque esta metodología representa una de las formas menos efectivas de utilizar el phase sensitive OTDR, también es la más sencilla de implementar. Por lo tanto, una buena alternativa para probar la capacidad del simulador de adaptarse a sistemas reales consiste en simular esta metodología.

Se emplea una fibra de longitud de 1 km, y el ruido tendrá una desviación estándar de 10^{-5} V/m. Además los parámetros tenso-ópticos vendrán dados por:

- $\mu_\epsilon = 0,17$
- $p_{11} = 0,121$
- $p_{12} = 0,27$

Se introducen tres perturbaciones

- Variación de tensión de $10 \cdot 10^{-11}$ ϵ , desde los 100 hasta los 150 metros.
- Variación de tensión de $3 \cdot 10^{-11}$ ϵ , desde los 300 hasta los 500 metros.
- Variación de tensión de $7 \cdot 10^{-11}$ ϵ , desde los 600 hasta los 700 metros.

El sistema DVS simulado utiliza la intensidad de la luz directamente sin la necesidad de hacer uso de un sistema de fases diferenciales (ver sección 2.6.1). Debido a esto, el sistema no emplea un gauge length, el cual en un sistema de fases diferenciales debe ser utilizado para medir las variaciones en la fase. De esta forma, la resolución espacial W es el único parámetro relevante para interpretar las distancias en las trazas DVS.

La simulación del funcionamiento del sistema DVS se lleva a cabo de la siguiente manera: se adquieren las trazas del campo eléctrico de backscattering antes y después de aplicar las perturbaciones. A estas trazas se les calcula el módulo al cuadrado en cada punto de la traza, lo cual es equivalente a calcular la intensidad de la luz. Por último, se restan las trazas de intensidad obtenidas.

En la figura 62 se puede observar la diferencia de las intensidades de los campos de backscattering antes y después de la perturbación, según la simulación:

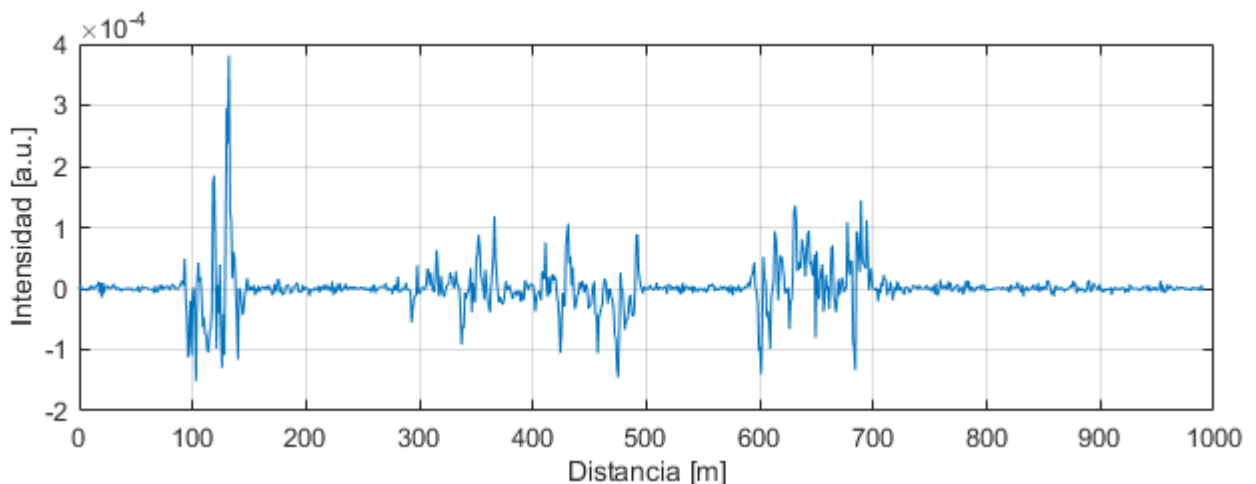


Figura 62: Traza DVS simulado en base a detección por intensidad

En la Figura 62 se observa que toda la traza presenta variaciones. Se identifican 3 zonas con variaciones de alta magnitud, pero sin seguir ningún tipo de patrón, además de una delimitación de la zona en la cual ocurren estas perturbaciones de mayor magnitud.

Las variaciones menores en magnitud corresponden al ruido simulado, mientras que las variaciones mayores corresponden a las variaciones de tensión introducidas.

Como se detalla en la sección 2.6.1, mediante el uso de un sistema DVS es posible identificar las distancias en las cuales empiezan y terminan las perturbaciones. Analizando la figura 62:

- La primera perturbación empieza aproximadamente en los 100 metros y termina en los 150 metros.
- La segunda perturbación empieza aproximadamente en los 300 metros y termina en los 500 metros.
- La tercera perturbación empieza aproximadamente en los 600 metros y termina en los 700 metros.

Pese a que existe ruido en las curvas de intensidad, es posible interpretar los puntos de inicio y final de las perturbaciones, aunque podría darse el caso en que un mayor ruido imposibilite la capacidad de interpretar las curvas de intensidad. Cabe destacar que no es posible adquirir información sobre la magnitud de las mismas, solo sobre sus posiciones.

Lo mencionado anteriormente ocurre porque la intensidad de la luz no posee intrínsecamente información asociada a los cambios de fase, al menos, no de manera lineal, esto se debe a la forma en que la fase afecta a la intensidad (a través de relaciones no lineales), esto se explicó a mayor profundidad en la sección 2.3 y sobre todo en la ecuación 34 que describe el campo eléctrico de backscattering [47].

4.4. Detección de perturbación dinámica por intensidad

Otra posible aplicación de la metodología de análisis de intensidad es la recuperación, aproximada, de la frecuencia de las perturbaciones. En esta simulación se muestra el espectro en frecuencia de una fibra óptica perturbada por variaciones de tensión en distintas posiciones y a diferentes frecuencias:

- La primera perturbación tiene lugar entre los 100 a 160 metros, y está dada por el siguiente perfil de perturbación:

$$\Delta\epsilon_1(t, z) = 6 \cdot 10^{-9} \sin(2\pi 2000t) \sin(1,4\pi \frac{z - 100}{60}) [\epsilon] \quad (72)$$

- La segunda perturbación tiene lugar entre los 700 a 750 metros, y está dada por el siguiente perfil de perturbación:

$$\Delta\epsilon_2(t, z) = 6 \cdot 10^{-9} \sin(2\pi 16000t) \sin(2\pi \frac{z - 700}{50}) [\epsilon] \quad (73)$$

- La tercera perturbación tiene lugar entre los 800 a 830 metros, y está dada por el siguiente perfil de perturbación:

$$\Delta\epsilon_3(t, z) = 6 \cdot 10^{-9} \sin(2\pi 20000t) \sin(3\pi \frac{z - 800}{30}) [\epsilon] \quad (74)$$

La longitud de la fibra es de 1 Km y se ingresa un ruido con una desviación estándar de 10^{-5} V/m, para la simulación se hace uso de una frecuencia de muestreo lenta¹³ de 100 KHz aproximadamente, lo que se traduce en un tiempo de muestreo lento t_{sl} de 10 μ s.

De igual manera que en la simulación anterior se recupera los campos eléctricos y a partir de estos se calcula la intensidad como el cuadrado del módulo complejo del campo eléctrico. De esta forma el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Se fija una traza sin perturbaciones como la traza de referencia.
2. Se adquiere una serie de T trazas phase sensitive OTDR; entre cada una de ellas, se generan los cambios según las ecuaciones 72, 73 y 74, con una diferencia de t_{sl} (10 μ s) entre cada traza.
3. De cada una de las trazas anteriores se calcula la intensidad, y a todas se le resta la intensidad de la traza de referencia. De esta forma se genera una cantidad T de restas, donde cada resta tiene una cantidad M de puntos.
4. Se genera una cantidad M de FFT's, por cada posición de la fibra óptica, de forma que cada FFT tiene T puntos.
5. Se gráfica la magnitud de las FFT obtenida ajustando el rango de color para poder analizar bien las frecuencias presentes.

Se espera que estén presentes las frecuencias de las perturbaciones en las posiciones en las cuales éstas ocurrieron, con armónicos alrededor de éstos debido al comportamiento no lineal que poseen las diferencias de intensidades respecto a las diferencias de fase, esto puede concluirse de la ecuación 34 que describe la relación entre el campo eléctrico de backscattering y la fase [47].

En las figuras 63 se pueden observar el resultado de la simulación realizada. Se grafica la FFT de la traza para todas las distancias.

¹³La frecuencia de muestreo lenta f_{sl} está definida en la sección 2.4 y está asociada a la frecuencia a la cual se emiten nuevos pulsos

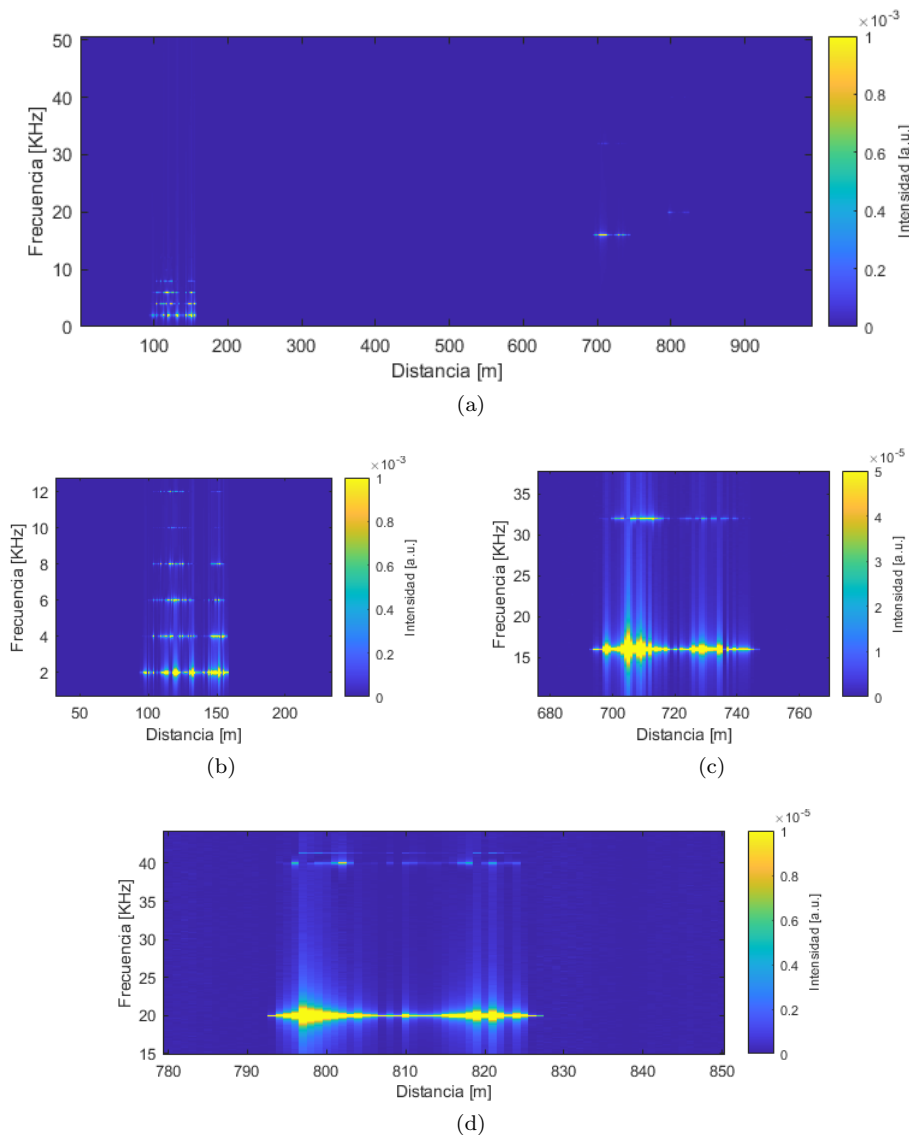


Figura 63: Detección dinámica de perturbación por análisis de intensidad. (a) FFT de la fibra completa, es posible observar los 3 puntos de perturbación. (b) Zoom a la perturbación de 2 KHz. (c) Zoom a la perturbación de 16 KHz. (d) Zoom a la perturbación de 20 KHz.

De la figura 63 (a) se puede observar la FFT en toda la longitud de la fibra óptica. En las figuras 63 (b), (c) y (d); se pueden observar zoom a las perturbaciones detectadas en la traza. En estas últimas se puede notar la aparición de armónicos debido a la no linealidad de la intensidad con respecto a la variación de fase.

Del análisis de las frecuencias fundamentales en las perturbaciones detectadas, se hace presente el siguiente patrón de frecuencias en las siguientes posiciones:

- 10KHz a una distancia aproximada de 100 a 160 metros, según la figura 63 (b).
- 16KHz a una distancia aproximada de 700 a 740 metros, según la figura 63 (c).
- 20KHz a una distancia aproximada de 800 a 830 metros, según la figura 63 (d).

Esto demuestra las capacidades que tiene un sensor phase sensitive OTDR trabajado en intensidad o DVS, pudiendo no solamente detectar las posiciones en donde ocurren variaciones, sino que además es posible detectar las frecuencias fundamentales de las perturbaciones.

Por otro lado, como era de esperar, no es posible recuperar información sobre la magnitud de las perturbaciones ni sobre el perfil temporal o espacial que tienen las perturbaciones generadas.

4.5. Reconstrucción temporal de cambio térmico por análisis de fase diferencial

El simulador puede adquirir información sobre la magnitud y posición de perturbaciones térmicas en el tiempo. En esta simulación se explora dicha capacidad utilizando una fibra óptica de 2 km de longitud, un ruido óptico con una

desviación estándar de 10^{-6} V/m y un gauge length de 10 metros.

Se simula una perturbación térmica uniforme desde los 900 hasta los 1100 metros, la cual presenta el siguiente comportamiento temporal:

$$\Delta T = 10 \cdot (1 - e^{-10 \frac{t}{10}}) \text{ [K]} \quad (75)$$

La perturbación se simula durante 10 segundos a una frecuencia de muestreo lenta de f_{sl} de 100 Hz. Por lo tanto, el periodo de muestreo lento t_{sl} tiene un valor de 0.01 segundos.

Para reconstruir la perturbación, se analiza una posición afectada por la perturbación térmica. Como se ha estudiado en la sección 3.3.6, la existencia de la variable $\Lambda(p)$ hará que cada punto en la traza tenga una desviación aleatoria respecto al valor correcto ideal, tanto para la curva de \bar{n} como para la curva de las recuperaciones de temperatura y vibración. Sin embargo, como el comportamiento estocástico de $\Lambda(p)$ es propio de la distancia de donde proviene (esto porque $\Lambda(p)$ se origina de los reflectores acumulados), entonces es prudente linealizar cada punto en la fibra. De esta forma, es posible compensar el comportamiento de $\Lambda(p)$ para una vecindad de variaciones del índice de refracción.

Dado lo anterior, se realiza el siguiente procedimiento para calibrar un punto cualquiera de la fibra óptica:

1. Se simula una perturbación conocida en toda la fibra óptica (o al menos en el área que se desea calibrar), en esta simulación dicha perturbación tiene una magnitud de 5 K.
2. Se realiza una recuperación de temperatura en la distancia de interés.
3. Se calcula un factor calibración F_c dado por:

$$F_c = \frac{\Delta T_{\text{real}}}{\Delta T_{\text{Sim}}} \quad (76)$$

Donde ΔT_{real} representa la variación real de temperatura introducida, en este caso, 5 K, y ΔT_{Sim} es la variación de temperatura obtenida en la simulación en la distancia de interés.

4. Se almacena el factor de calibración F_c .

Del algoritmo anterior se obtiene un factor de calibración F_c , el cual permite realizar mediciones más precisas a una distancia específica. Sin embargo, debido al ruido presente en las mediciones, la ganancia F_c se ve afectada por dicho ruido. Una forma de contrarrestar este fenómeno es repetir el algoritmo un número K de veces, lo que resulta en una serie de factores de conversión F_{ci} . De esta manera, es posible calcular una ganancia promedio mediante la media geométrica, de la siguiente manera:

$$F_c = \sqrt[K]{\prod_{i=1}^K F_{ci}} \quad (77)$$

Gracias a todo lo anterior se elige arbitrariamente los 940 metros como la distancia de interés. De esta forma el procedimiento completo para recuperar la variación de temperatura consiste en:

1. Se fija la traza de referencia.
2. Se aplica una perturbación conocida de valor 5 K sobre toda la fibra óptica.
3. Se calculan 10 factores de calibración F_{ci} y se realiza una media geométrica para obtener el valor de F_c según la ecuación 77.
4. Se retira la perturbación de 5 K.
5. Con ayuda de un arreglo de datos que representa el paso del tiempo cada 0.01 segundos, se simula la perturbación térmica. Haciendo uso del simulador se recupera la curva $\Delta \bar{n}$ aproximado para cada una de las perturbaciones en los distintos tiempos.
6. Gracias a la ecuación 53 que describe la relación entre el índice de refracción y la variación de temperatura, se obtiene la variación de temperatura en la distancia de interés a través de la variación del índice de refracción.
7. Se almacena la temperatura anterior multiplicándola por el factor de calibración F_c .

Finalmente, para fines de comparación, se gráfica el resultado de la reconstrucción junto a la perturbación original.

Se espera observar una curva reconstruida que se acerque a la curva original, sin embargo esta curva tendrá desviaciones debidas al ruido simulado asociado al campo electromagnético.

En la figura 64 se observa la reconstrucción temporal de la perturbación simulada.

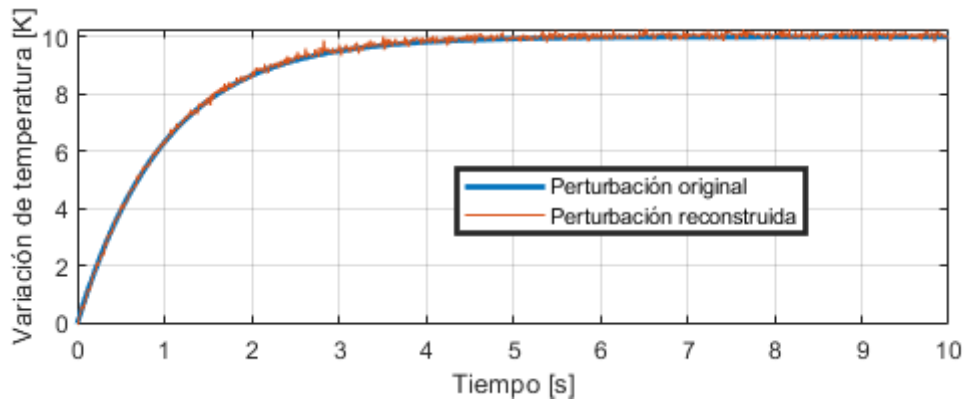


Figura 64: Reconstrucción temporal de una perturbación térmica por medio de análisis de variación de fase.

De la figura 64, se puede observar que la perturbación térmica coincide con la originalmente simulada, con la diferencia de que existe ruido asociado al campo electromagnético. Pese a esto, la tendencia de la reconstrucción es clara respecto a la curva original, lo que confirma las capacidades de reconstrucción temporal para perturbaciones térmicas.

4.6. Reconstrucción temporal de variación tensorial de tono puro por análisis de fase diferencial

El objetivo principal de esta memoria es simular perturbaciones acústicas y un sensor DAS con el cual se puedan recuperar dichas perturbaciones. En esta simulación se verifica la capacidad del simulador para llevar a cabo esta tarea.

El propósito de la simulación es recuperar la siguiente perturbación tensorial compuesta por un tono puro de 500 Hz, aplicado desde los 500 a 650 metros:

$$\Delta\epsilon(t) = 7 \cdot 10^{-12} \sin(t2\pi500) [\epsilon] \quad (78)$$

Para llevar a cabo este proceso se utiliza el factor de calibración F_c descrito en la simulación anterior y en la ecuación 76. Se simula una perturbación de $0.1 \text{ p}\epsilon$ en toda la fibra y se calcula el factor de calibración F_c en todas las distancias según el algoritmo presentado en la simulación previa.

La fibra simulada tiene una longitud de 2 Km y se utiliza un gauge length de 10 metros. Se simula un ruido óptico con una desviación estándar de $0,25 \cdot 10^{-5} \text{ V/m}$, y se emplea la frecuencia de muestreo lenta f_{sl} máxima posible, la cual es 50 KHz, lo que equivale a un tiempo de muestreo lento de $20 \mu\text{s}$.

La simulación completa consta de:

1. Se fija la traza de referencia.
2. Se introduce una perturbación conocida de $10 \text{ p}\epsilon$ en toda la fibra para encontrar un valor de F_c para cada distancia de la fibra óptica.
3. Se retira la perturbación de $10 \text{ p}\epsilon$.
4. Con ayuda de un arreglo de datos que representa el paso del tiempo cada $50 \mu\text{s}$, se simula la perturbación tensorial. Haciendo uso del simulador se recupera la curva $\Delta\bar{n}$ aproximado para cada una de las perturbaciones en los distintos tiempos.
5. Gracias a la ecuación 54 que describe la relación entre el índice de refracción y la variación de tensión, se obtiene la variación de tensión en toda la fibra, está variación se multiplica por la ganancia que le corresponde según su posición.
6. Se almacenan todos los datos obtenidos de variación de tensión en función de la distancia.

De esta forma, es posible elegir una distancia arbitraria (que haya sido afectada por la perturbación) y recuperar la variación de tensión en dicho punto. Se elige arbitrariamente una distancia de 570 metros. En la figura 65 se puede observar el resultado de la reconstrucción. Es posible comprobar que la reconstrucción se lleva a cabo de manera adecuada, sin embargo, existen variaciones asociadas al ruido óptico.

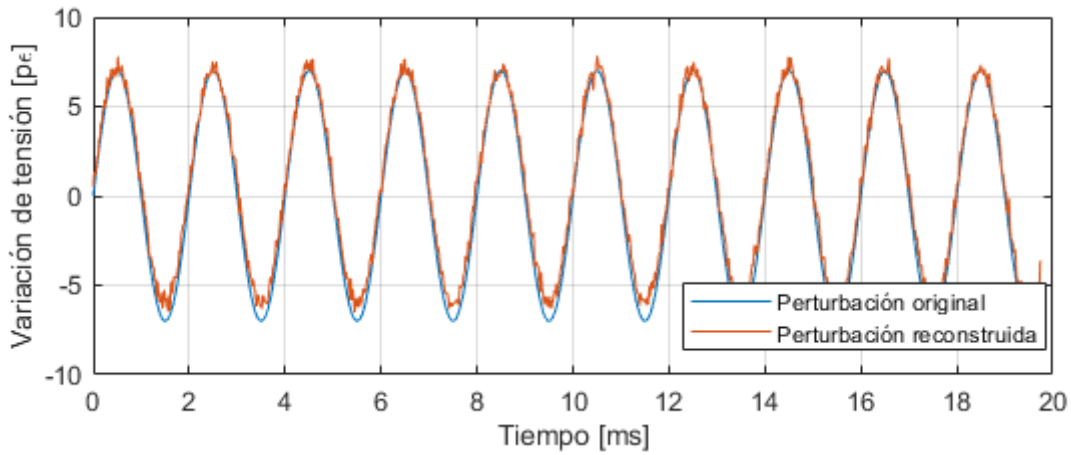


Figura 65: Reconstrucción de una variación de tensión de 500 Hz

De los resultados anteriores se puede calcular, también, la FFT de la variación de tensión en toda la fibra. Para este fin, se calcula la FFT para toda la fibra dadas las variaciones de tensión calculadas previamente. En la figura 66 se puede observar la FFT en toda la fibra óptica.

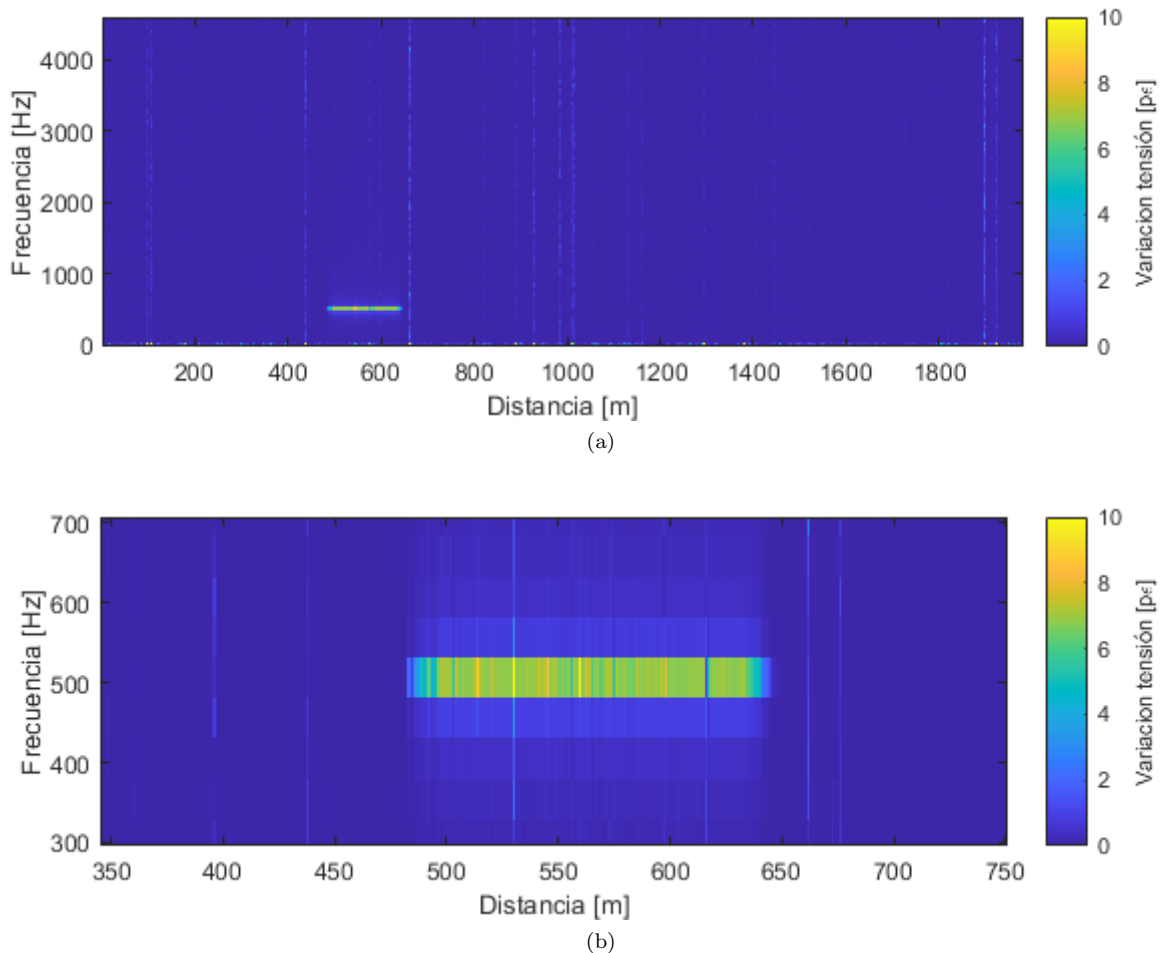


Figura 66: FFT de la recuperación de una variación de tensión sinusoidal pura. (a) FFT de la fibra completa, es posible observar la perturbación tensorial en entre los 500 y 650 metros. (b) Zoom a la perturbación tensorial de 500 Hz.

Es posible observar dos aspectos importantes en la figura 66 (a): la variación de tensión en la zona afectada y la ausencia de armónicos, a diferencia de los resultados obtenidos al analizar la intensidad de la luz (sensor DVS) en simulaciones previas y en las imágenes 63.

De la figura 66 (b), se puede apreciar que la magnitud de la variación es similar a la tensión simulada, es decir,

una magnitud de $7 \text{ p}\epsilon$.

En las figuras 66 se pueden observar bandas de frecuencia verticales en ciertas distancias, las cuales se producen debido al ruido óptico. Las variaciones causadas por el ruido son tan significativas que causan fallos en el algoritmo de desenvolvimiento, lo que tiene por consecuencia que aparezcan componentes en todo el espectro asociado a dichas variaciones [72].

Se concluye que el simulador es capaz de reconstruir variaciones de tensión dinámica de tono puro en una fibra óptica.

4.7. Reconstrucción temporal de variación tensorial por análisis de fase diferencial

En esta simulación se realiza una última aplicación de la recuperación de tensión. Para este fin, se simula una perturbación tensorial diferente a un tono puro. La perturbación en cuestión es:

$$\Delta\epsilon = 7 \cdot 10^{-12} \text{triang}(t, 3948 \cdot 10^{-6}) [\epsilon] \tag{79}$$

Donde $\text{triang}(x, \tau)$ es una función triangular simétrica descrita por:

$$\text{triang}(x, \tau) = \begin{cases} \frac{2x+\tau}{\tau} & \text{si } x < 0 \\ \frac{\tau-2x}{\tau} & \text{si } x \geq 0 \end{cases} \tag{80}$$

En otras palabras, τ indica el período de la perturbación triangular.

Esto significa que la perturbación consistirá en un tren de triangulares con una frecuencia de 253.3 Hz.

Como referencia, en la figura 67 se observa la FFT de la perturbación simulada.

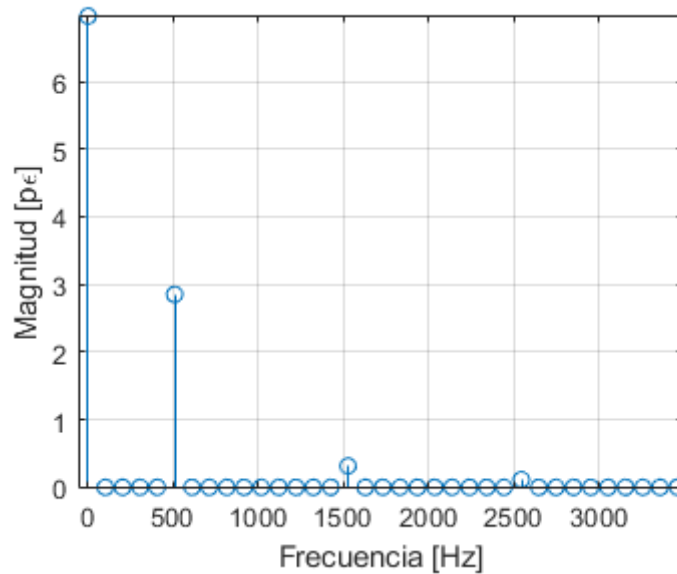


Figura 67: FFT de la perturbación triangular en la simulación dinámica.

Para recuperar el valor de la variación de tensión, se lleva a cabo exactamente el mismo procedimiento que en la simulación anterior.

Se usa una fibra óptica de longitud de 2 Km, un ruido óptico con desviación estándar de $0,125 \cdot 10^{-5} \text{ V/m}$ y un gauge length de 10 metros.

En la Figura 68 se muestra la reconstrucción de una perturbación triangular. Es posible observar cómo la perturbación reconstruida sigue a la perturbación inicial, con desviaciones asociadas al ruido óptico de la señal.

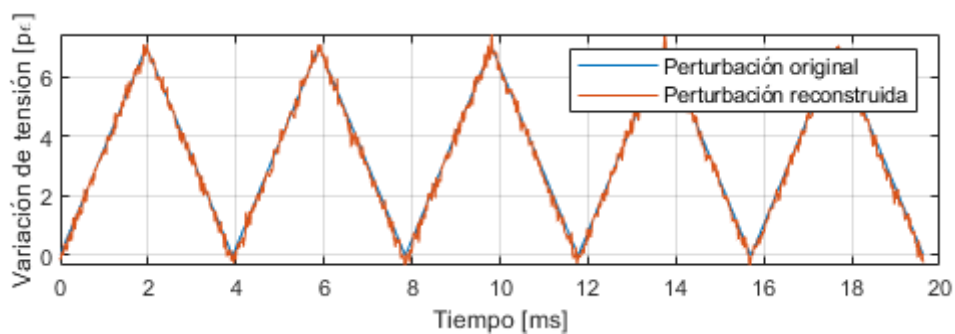


Figura 68: Reconstrucción de una perturbación dinámica de tensión equivalente a un tren de funciones triangulares

En la figura 69 se observa la FFT en toda la fibra óptica, en donde es posible observar que la perturbación es detectada y correctamente recuperada. Los valores de la FFT pueden ser comparados con los obtenidos en la figura 67, comprobando que resultan similares. Por otro lado, se observa que no existen comportamientos espectrales diferentes de los esperados.

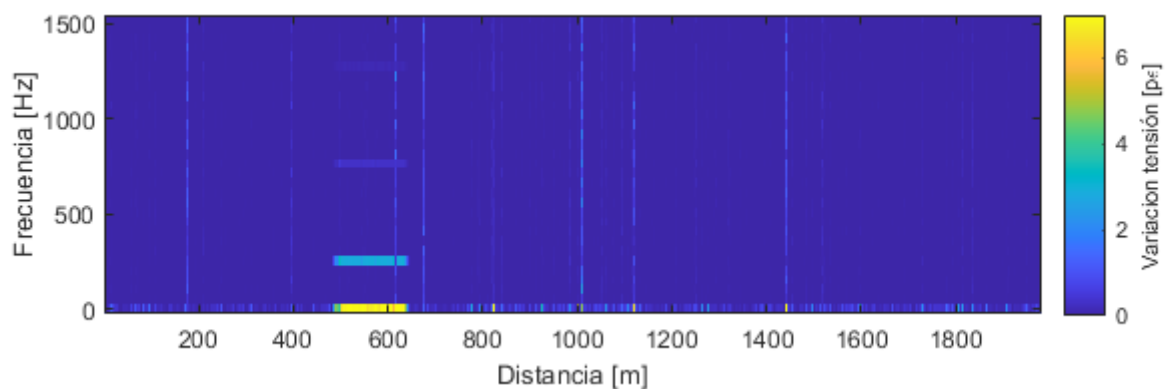


Figura 69: FFT de la fibra con una perturbación de tensión consistente en un tren de triángulos.

De esta forma, se comprueba que es posible reconstruir perturbaciones tensoriales complejas haciendo uso del DAS simulado.

5. Conclusiones

El presente documento tiene por objetivo la explicación del funcionamiento del simulador, además de explicar la teoría detrás del mismo. Al finalizar todo el trabajo, es posible tener una comprensión completa del fenómeno físico de dispersión de Rayleigh, de su efecto en la fibra óptica y cómo esto da origen a la llamada onda de backscattering. Además, se logró obtener una comprensión de los sistemas OTDR y phase-sensitive OTDR que hacen uso de esta señal para obtener información de la fibra o el ambiente de la fibra.

El simulador fue explicado con rigurosidad, analizando cada uno de los componentes que lo conforman y validando cada una de sus partes con pruebas que demostraron ser acertadas y fidedignas a la realidad esperable. Finalmente, el documento concluyó con una serie de experimentos en los cuales se pudo observar una serie de simulaciones que fueron posibles realizar gracias a que el simulador es preciso y versátil.

En el proceso de creación del simulador se realizaron distintos cálculos matemáticos que terminaron por explicar el funcionamiento y comportamiento de las trazas de backscattering, entre las cuales se destaca la aparición de la variable $\Lambda(p)$, variable que determina en gran parte la aleatoriedad de la recuperación de perturbaciones.

Del trabajo realizado se destaca la modularidad del mismo, permitiendo modificar partes completas del simulador manteniendo el orden y funcionamiento del resto. Se compone de una serie de parámetros, aproximaciones y modelos que tienen por objetivo asimilarse a lo esperado en el mundo físico. Se destaca el parámetro del largo del segmento, el cual tiene una serie de consecuencias que pueden invalidar por completo la simulación, haciendo que la selección de un largo adecuado sea crítico a la hora de realizar la simulación.

Por otro lado, el simulador posee una serie de limitaciones asociadas a las capacidades del algoritmo y a los modelos seleccionados. Entre las limitaciones se destacan un bajo control sobre el muestreo de la señal y la incapacidad de trabajar de manera fiel a la realidad con sistemas de ancho espectral distinto de cero.

Sin embargo, pese a dichas limitaciones, se ha logrado construir un simulador que cumple con los requisitos de ser efectivo, tener un uso simple, ser riguroso (dentro de ciertas restricciones) con la realidad y tener una alta capacidad de escalabilidad para trabajos futuros.

Además, gracias a los paradigmas de programación utilizados el simulador es apto para poder ser utilizado en varios contextos, algunos casos de uso del simulador incluyen:

- **Uso didáctico:** Es posible utilizar el simulador para explicar el funcionamiento de la propagación de la luz como onda electromagnética en una fibra óptica, la dispersión de Rayleigh, la reflectometría óptica en el dominio temporal, phase sensitive OTDR y los sensores DAS, DVS y DTS.

Dada la naturaleza del simulador, es posible obtener diferentes parámetros, trazas, gráficos y datos que no son accesibles en el mundo real, como el campo eléctrico, el valor de los reflectores, la propagación del pulso incidente, etc. Esto proporciona herramientas adicionales con fines didácticos.

Además, es posible obtener trazas phase sensitive OTDR para verificar el efecto de ciertas operaciones en las mismas.

- **Mejoras:** Este simulador está modularizado, lo que significa que es posible incluir mejoras en el sistema sin tener que comenzar todo el trabajo desde cero.

Algunas de las posibles mejoras que puede tener el simulador son:

- **Mejora en algoritmo de producción de reflectores:** El algoritmo utilizado, aunque funcional, presenta una serie de restricciones debido a las aproximaciones que se emplean; una posible mejora consistiría en modificar el algoritmo de creación de reflectores y la manera en que estos son utilizados por el módulo Rayleigh.
Por ejemplo, algunos modelos de simulación hacen uso de variaciones en el índice de refracción [55][61] para calcular los reflectores.
Con otro modelo para el algoritmo de generación de reflectores, se podría desarrollar un sistema que permita crear un simulador OTDR a partir del simulador phase sensitive OTDR.
- **Soporte nativo para operaciones dinámicas:** El simulador diseñado y programado no cuenta nativamente con soporte para operaciones dinámicas. Esto implica que para llevar a cabo operaciones dinámicas, como las descritas en esta memoria, fue necesario realizar una serie de operaciones estáticas. Esto resultó en un código complejo, extenso y de difícil lectura, aspectos que deben evitarse en un código limpio [73].
- **Simulación de emisor realista:** Actualmente el simulador cuenta con un emisor simplificado que emite un pulso cuadrado de frecuencia única, la modificación del sistema y emisor para un soporte completo de un emisor puede complementar el simulador para ser utilizado en tareas más complejas y realistas.
- **Soporte nativo para operaciones en frecuencia:** En el mismo orden de ideas que el punto anterior, el sistema carece de operaciones nativas para calcular la FFT de las trazas, lo que hace que realizar estas operaciones resulte en códigos extremadamente complejos de leer.

Para utilizar este tipo de funcionalidades de manera regular, es crítico contar con un soporte nativo para operaciones relacionadas con las FFT.

- **Optimización:** Como se estudio en la sección 3.3.4, el simulador puede tener tiempos de ejecución extremadamente altos, lo que limita en gran medida la capacidad de realizar simulaciones útiles. Un ejemplo de estas restricciones se evidencia en las longitudes de los segmentos.

- **Diseño de sistemas de adquisición de datos:** El sistema diseñado no incluye una simulación para el sistema de adquisición de datos. Por lo tanto, una tarea que se podría llevar a cabo es el diseño o la implementación de un sistema de adquisición de datos para integrarlo con el simulador. De hecho, es posible crear una serie de esquemas de sistemas de adquisición de datos y comparar todos estos sistemas con el simulador.

Esto permite que el simulador pueda ser utilizado para probar sistemas de adquisición de datos sin la necesidad de contar con un sistema físico completo para realizar las pruebas.

- **Diseños de algoritmos de desenvolvimiento:** Uno de los problemas actuales del simulador es que, ante ciertas variaciones, el algoritmo de desenvolvimiento falla. Se puede diseñar un algoritmo de desenvolvimiento que tenga en consideración el entorno espacio-temporal, creando así un algoritmo híbrido que sea más robusto frente a fallas de desenvolvimiento, ampliando el rango de amplitudes de variaciones que puede simular.

De esta manera, al concluir el trabajo, se cuenta con un simulador capaz de emular un sensor acústico distribuido en fibra óptica basado en reflectometría óptica en el dominio temporal. El sistema diseñado e implementado posee todas las funcionalidades necesarias para ser utilizado y mejorado en proyectos futuros. De esta forma, se concluye que se han alcanzado los objetivos de implementar una opción económica, rápida y de bajo coste para la implementación de sistemas phase sensitive OTDR de prueba.

6. Bibliografía

- [1] I. Djordjevic, W. Ryan y B. Vasic, *Coding for Optical Channels*. Boston, MA: Springer US, 2010. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5569-20>.
- [2] Y. Du, W. Chen, K. Cui, Z. Guo, G. Wu y X. Ren, “An exploration of the military defense system of the Ming Great Wall in Qinghai Province from the perspective of castle-based military settlements”, *Archaeolog. Anthropolog. Sci.*, vol. 13, n.º 3, febrero de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01283-7>
- [3] G. Reischl, P. Wagner y G. Steiner, *Einführung in die Physik*. fac.wuv Univ., 2014.
- [4] F. Ronalds, *Descriptions of an Electrical Telegraph: And of Some Other Electrical Apparatus*, Forgotten Books, Forgotten Books, 2018.
- [5] “Who is credited with inventing the telephone?” The Library of Congress. Accedido el 26 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.loc.gov/everyday-mysteries/technology/item/who-is-credited-with-inventing-the-telephone/:.text=Alexander%20Graham%20Bell%20is%20credited,First%20Bell%20Telephone,%20June%201875>.
- [6] S. Hong, *Wireless*. MIT Press, 2001. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.7551/mitpress/7255.001.0001>
- [7] K. Rajagopal, *Textbook of Engineering Physics: Pt. I*. PHIL, 2008, ISBN 8120336658.
- [8] “Fundamentos de las Fibras Ópticas — Blog de Fibra Óptica y Redes del CIFP Tartanga”. Blog de Fibra Óptica y Redes del CIFP Tartanga — Contenidos de fibra óptica, cableado estructurado, radioenlaces y sistemas VSAT, instalaciones disponibles y actividades realizadas con los alumnos en el CIFP Tartanga. Accedido el 26 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://fibraoptica.blog.tartanga.eus/fundamentos-de-las-fibras-opticas/>
- [9] Y. Rao, Z. Wang, H. Wu, Z. Ran y B. Han, “Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR)”, *Photonic Sens.*, vol. 11, n.º 1, pp. 1–30, enero de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0619-4>
- [10] M. Soriano-Amat et al., “Time-expanded phase-sensitive optical time-domain reflectometry”, *Light: Sci. & Appl.*, vol. 10, n.º 1, marzo de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00490-0>
- [11] Jousset, Philippe; Reinsch, Thomas; Ryberg, Trond; Blanck, Hanna; Clarke, Andy; Aghayev, Rufat; Hersir, Gylfi Páll; Hennings, Jan; Weber, Michael; Krawczyk, Charlotte (2018): *Fibre-optic distributed acoustic sensing data from Reykjanes, Iceland*. V. 1.0. [En línea]. Disponible: GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.6.2.2018.003>
- [12] Williams, E. F., Fernandez-Ruiz, M. R., Magalhaes, R., Vanthillo, R., Zhan, Z., Gonzalez-Herraez, M., & Martins, H. F. (2019). *Belgium Distributed Acoustic Sensing Array Raw Data (1.0)* [En línea]. CaltechDATA. <https://doi.org/10.22002/D1.1296>
- [13] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd edition, 2021, ISBN: 978-1-119-73736-0.
- [14] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd edition, chapter 2.2.2, 2021, ISBN: 978-1-119-73736-0.
- [15] L. Rayleigh, “X. On the electromagnetic theory of light”, *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 12, n.º 73, pp. 81–101, agosto de 1881. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/14786448108627074>
- [16] L. Rayleigh, “XXXIV. On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky”, *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 47, n.º 287, pp. 375–384, abril de 1899. Accedido el 26 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/14786449908621276>
- [17] I.S. Grant, W.R. Phillips, *Electromagnetism*, 2008, Manchester Physics, John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-92712-9.
- [18] R. Fitzpatrick. “Rayleigh scattering”. Home Page for Richard Fitzpatrick. Accedido el 26 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://farside.ph.utexas.edu/teaching/em/lectures/node97.html>
- [19] J. W. Strutt, “XV. On the light from the sky, its polarization and colour”, *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 41, n.º 271, pp. 107–120, febrero de 1871. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/14786447108640452>

- [20] "History of Fiber Optics — Timbercon". Timbercon. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.timbercon.com/resources/blog/history-of-fiber-optics/>
- [21] C. Bihary. "Fiber Facts—Yes, You Do Need to Read This". Network Visibility — Garland Technology. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.garlandtechnology.com/blog/fiber-facts-yes-you-do-need-to-read-this>
- [22] P. Healey, "Statistics of Rayleigh Backscatter From a Single-Mode Fiber", IEEE Trans. Commun., vol. 35, n.º 2, pp. 210–214, 1987. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/tcom.1987.1096744>
- [23] J. Pierri. "info@citel". OAS - Organization of American States: Democracy for peace, security, and development. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.oas.org/es/citel/infocitel/2010/abril/ftth_e.asp
- [24] Y. Freedman, S. Zemansky, Física Universitaria, Volumen 2, pag. 112, ISBN-10: 9702605121
- [25] M. Born, E. Wolf, Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, p. 37., ISBN-13: 978-0-521-64222-4
- [26] Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd edition, chapter 2.1, 2021, ISBN: 978-1-119-73736-0
- [27] R. L. Deveau, Fiber Optic Lighting: A Guide for Specifiers, 2a ed. Fairmont Press, 2000. . C. Maxwell, A dynamical theory of the electromagnetic field. London: Roy. Soc., 1865.
- [28]] Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd edition, chapter 3., 2021, ISBN: 978-1-119-73736-0.
- [29]] Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 3rd edition, chapter 4., 2021, ISBN: 978-1-119-73736-0.
- [30] A. T. Young, "Rayleigh scattering", Appl. Opt., vol. 20, n.º 4, p. 533, febrero de 1981. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1364/ao.20.000533>
- [31] J. Hecht, Understanding fiber optics, 2a ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1993.
- [32] S. J. H, Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. New York: Wiley, 1998. Chapter 15.1.1.
- [33] R. Nave. "Blue Sky and Rayleigh Scattering". Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html#c2>
- [34] Contributors to Wikimedia projects. "Rayleigh scattering - Wikipedia". Wikipedia, the free encyclopedia. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_scattering/media/File:Rayleigh_sunlight_scattering.svg
- [35] D. A. McQuarrie, Statistical mechanics. Sausalito, Calif: University Science, 2000.
- [36] B. Bleaney y B. I. Bleaney, Electricity and Magnetism, Volume 1: Third edition. Oxford Univ. Press, 2013.
- [37] C. E. Shannon, "Communication in the Presence of Noise", Proc. IRE, vol. 37, n.º 1, pp. 10–21, enero de 1949. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969>
- [38] H. Wu, M. Tang, "Beyond the Limitation of Pulse Width in Time-domain Reflectometry", DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.09461>
- [39] Contributors to Wikimedia projects. "Optical fiber - Wikipedia". Wikipedia, the free encyclopedia. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber/media/File:Singlemode_fibre_structure.svg
- [40] Colaboradores de los proyectos Wikimedia. "Función de Bessel - Wikipedia, la enciclopedia libre". Wikipedia, la enciclopedia libre. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: [https://es.wikipedia.org/wiki/Función_de_Bessel/media/Archivo:Bessel_Functions_\(1st_Kind,_n=0,1,2\).svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Función_de_Bessel/media/Archivo:Bessel_Functions_(1st_Kind,_n=0,1,2).svg)

- [41] A. Rodríguez. “Conceptos básicos para utilizar un OTDR (5^a parte, trazas)”. *fibraopticalhoy* periódico técnico sobre fibra óptica online desde 2001. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.fibraopticalhoy.com/conceptos-basicos-para-utilizar-un-otdr-5a-parte-interpretacion-de-trazas/>
- [42] Editado de : İ. Ölçer y A. Öncü, “Adaptive Temporal Matched Filtering for Noise Suppression in Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing”, *Sensors*, vol. 17, n.º 6, p. 1288, junio de 2017. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/s17061288>
- [43] Frovel, M. & Guemes, Alfredo & Pintado, Jose-Maria & Olmo, E. & Obst, A.. (2006). Multiplexable Fiber Bragg grating temperature sensors embedded in CFRP structures for cryogenic applications.
- [44] M. Okaji, N. Yamada, K. Nara y H. Kato, “Laser interferometric dilatometer at low temperatures: application to fused silica SRM 739”, *Cryogenics*, vol. 35, n.º 12, pp. 887–891, diciembre de 1995. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(95\)96887-r](https://doi.org/10.1016/0011-2275(95)96887-r)
- [45] P. Morris, A. Hurrell, A. Shaw, E. Zhang y P. Beard, “A Fabry–Pérot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure”, *J. Acoustical Soc. America*, vol. 125, n.º 6, pp. 3611–3622, junio de 2009. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1121/1.3117437>
- [46] C. D. Butter y G. B. Hocker, “Fiber optics strain gauge”, *Appl. Opt.*, vol. 17, n.º 18, p. 2867, septiembre de 1978. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1364/ao.17.002867>
- [47] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press, 2017, chapter 6. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
- [48] O. A. Lopez, “Optimización de las técnicas de desenvolvimiento de fase en dos dimensiones”, tesis de maestría, Univ. Auton. Del Estado Mex., 2017. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/68053>
- [49] K. Itoh, “Analysis of the phase unwrapping algorithm”, *Appl. Opt.*, vol. 21, n.º 14, p. 2470, julio de 1982. Accedido el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1364/ao.21.002470>
- [50] Dakin, J. P., and C. Lamb. 1990. Distributed fibre optic sensor system. GB2222247A.
- [51] J. P. Graells, “Chirped-Pulse Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry”, tesis doctoral, Universidad de Alcalá, 2018.
- [52] Matias, G. R. V., “Radar interferometry: 2d phase unwrapping via graph cuts”, Tesis Doctoral no publicada). Instituto Superior Técnico, 2006
- [53] M. H. DeGroot, *Probability and statistics*, 4a ed. Boston: Pearson Educ., 2012. page 309
- [54] Lu, X., & Thomas, P. J. (2020). Numerical Modeling of Φ OTDR Sensing Using a Refractive Index Perturbation Approach. *Journal of Lightwave Technology*, 38(4), 974–980. <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2949624>
- [55] P. Tovar Braga, J. P. Von der Weid y B. Costa Lima, “Modelling intensity fluctuations of Rayleigh backscattered coherent light in single-mode fibers”, *J. Lightw. Technol.*, p. 1, 2022. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/jlt.2022.3164793>
- [56] R. P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*. Brand, 1963. p 22-10
- [57] P. Gysel y R. K. Staubli, “Spectral properties of Rayleigh backscattered light from single-mode fibers caused by a modulated probe signal”, *J. Lightw. Technol.*, vol. 8, n. 12, pp. 1792–1798, 1990. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/50.62872>
- [58] M. Jiang, P. Zhou, H. Xiao y P. Ma, “A high-power narrow-linewidth 1018 nm fiber laser based on a single-mode–few-mode–single-mode structure”, *High Power Laser Sci. Eng.*, vol. 3, 2015. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1017/hpl.2015.24>
- [59] R. Hrbac, T. Mlcak, V. Kolar y T. Vantuch, “Low-Cost Extra-Low Voltage LED Dimmer for Tuneable White Lighting”, *Elektron. Ir Elektrotehnika*, vol. 25, n.º 3, pp. 43–49, junio de 2019. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.25.3.23675>

- [60] "Optical Fiber Loss and Attenuation". Fosco Connect. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95048006-optical-fiber-loss-and-attenuation>
- [61] A. Masoudi y T. P. Newson, "Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling", *Opt. Exp.*, vol. 25, n.º 25, p. 32021, diciembre de 2017. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1364/oe.25.032021>
- [62] Y. Rao, Z. Wang, H. Wu, Z. Ran y B. Han, "Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR)", *Photonic Sens.*, vol. 11, n.º 1, pp. 1–30, enero de 2021. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0619-4>
- [63] H. Gabai y A. Eyal, "On the sensitivity of distributed acoustic sensing" *Opt. Lett.*, vol. 41, n.º 24, p. 5648, diciembre de 2016. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1364/ol.41.005648>
- [64] A. W. Snyder, *Optical waveguide theory*. London: Chapman Hall, 1983.
- [65] "Programación orientada a objetos — Blog UE". Universidad Europea. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://universidadeuropea.com/blog/programacion-orientada-objetos/>
- [66] P. Fernández. "Qué es la programación funcional y características — OpenWebinars". OpenWebinars.net. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://openwebinars.net/blog/que-es-la-programacion-funcional-y-sus-caracteristicas>
- [67] A. Herrera. "Programación Orientada a Objetos clases, atributos y métodos". medium.com. Accedido el 13 de Noviembre de 2023. [En Línea]. Disponible: <https://medium.com/@a.herrerapuestas/clases-atributos-y-metodos-en-la-programacion-orientada-a-objetos-93be2831934e>
- [68] Y. Fernández. "API: qué es y para qué sirve". Xataka - Tecnología y gadgets, móviles, informática, electrónica. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.xataka.com/basics/api-que-sirve>
- [69] "Desplazar ángulos de fase - MATLAB unwrap- MathWorks América Latina". MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/unwrap.html>
- [70] H. Fischer, *A History of the Central Limit Theorem*. New York, NY: Springer New York, 2011. Pagina 3. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87857-7>.
- [71] Peyton Z. Peebles Jr, *Probability, Random Variables, and Random Signal Principles*, second edition, chapter 3.
- [72] P. Varaiya. "Notes for EECS 120" Sp 2002. chapter 2 Fourier Transform, extracted from <https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee120/sp06/handouts/Chapter2.pdf> the 10/04/2024.
- [73] SYDLE. "Clean code: ¿cuáles son las buenas prácticas de programación?" Blog SYDLE. Accedido el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.sydle.com/es/blog/clean-code-602bef23da4d09680935509b>