



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

ANÁLISIS DE UN SISTEMA ϕ -OTDR EMPLEANDO FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. ALINA ASIN HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
UNAM

Ciudad Universitaria, México. Septiembre 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oleksandr Martynyuk
Secretario: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón
1^{er}. Vocal: Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera
2^{do}. Vocal: Dr. Francisco Javier García Ugalde
3^{er}. Vocal: Dr. José María Matías Maruri

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE
DR. DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA

FIRMA

PENSAMIENTO

Siempre parece imposible hasta que se hace.

Nelson Mandela.

*En tres palabras puedo resumir todo lo que he aprendido
acerca de la vida. Continúa hacia adelante.*

Robert Frost.

DEDICATORIA

A mi pequeña hija Ana Sofía quien es mi motor, mi guía y el gran amor de mi vida.

A mis abuelos Alba y Titi siempre serán mi sol en lo oscuridad, no existirá vida para devolverles su amor.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre que siempre me apoyo e impulso a mejorar profesionalmente.

A mi abuela Alba Tur por enseñarme a amar los libros.

A mi tutor Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera por apoyarme siempre incluso cuando yo no creía en mí. Gracias por su paciencia y su voz calmada.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrir sus puertas y recibirme, por permitirme crecer profesionalmente.

A CONACyT por el apoyo económico en la realización de esta tesis.

Al proyecto DGAPA-PAPIIT No. IN106023 dentro del cual se realizó el presente trabajo de investigación.

A mi amiga Izamar gracias por acompañarme en este viaje y darme siempre tu mejor consejo en el mejor momento, por ser especial.

A mis amigos de siempre Sixto, Claudia, Mailén y Karen cuanto hemos vivido en este gran país, gracias por el café, las tertulias y las risas por estar siempre y convertirse en familia.

A todos los profesores que me brindaron su tiempo y conocimiento para mi bien y el de todos los estudiantes.

A todos los amigos que conocí en este trocito de vida que me aportaron amor y cercanía para sentirme como en casa.

A ti C. que siempre estás ahí para mi incluso cuando soy mi peor enemiga.

¡¡A todos Gracias!!

RESUMEN

Los sensores distribuidos de fibra óptica tienen la potencialidad de detectar tensiones y presiones ejercidas sobre la fibra causadas por vibraciones y otros tipos de perturbaciones externas, así como también cambios de temperatura a lo largo de toda la fibra. En este sentido, la fibra óptica es utilizada como un sensor en toda su extensión. Estos sensores distribuidos facilitan el monitoreo de estructuras civiles como edificios y puentes, así como la salud estructural de ductos hidráulicos y oleoductos con el objeto de medir vibraciones que puedan generar fracturas en estas estructuras y con ello prevenir rupturas severas.

Los sistemas de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (ϕ -OTDR) forman parte de este tipo de sensado distribuido que monitoriza toda una estructura empleando una fibra óptica instalada sobre esta y empleando a su vez un solo dispositivo de procesamiento de señales ofreciendo claras ventajas con respecto al uso de múltiples sensores puntuales.

El presente trabajo presenta un estudio teórico y numérico del funcionamiento de un sistema ϕ -OTDR identificando los procesos físicos involucrados que permiten a la fibra óptica actuar como un elemento sensor para detectar vibraciones en forma distribuida sobre una estructura específica. Con base en nuestro estudio se ha podido identificar nuevos elementos que permiten incrementar la sensibilidad del sistema ϕ -OTDR para detectar vibraciones tales como el empleo de fibras ópticas dopadas dentro del diseño del sistema. En particular, se ha estudiado cómo el incremento de una concentración de dopante de dióxido de Germanio GeO_2 en el núcleo de una fibra óptica convencional SMF28 fabricada con dióxido de Silicio SiO_2 permite incrementar la densidad y el índice de refracción del núcleo de la fibra, y a su vez permite modificar la respuesta del sistema ϕ -OTDR, haciendo que su sensibilidad se incremente en regiones de operación donde anteriormente se tenía una mínima detección.

Para la comprensión de funcionamiento de este sistema de sensado se describen las características fundamentales de un reflectómetro óptico en el dominio (OTDR, por sus siglas en inglés) el cual se le denomina OTDR convencional, y cómo éste puede extenderse a un OTDR sensible a la fase, denominado ϕ -OTDR. También se describen los conceptos físicos del retro-esparcimiento de Rayleigh, y la coherencia de la luz para entender los resultados que arrojan estos sistemas de medición los cuales son a través de gráficas o

trazas de potencia de luz reflejada a lo largo de la fibra óptica. En este contexto, se realizan algoritmos que simulan las trazas de potencia de salida de un sistema ϕ -OTDR los cuales fueron validados con experimentos reportados en literatura, así como también siguiendo técnicas de verificación basadas en distribuciones de probabilidad. Estas trazas del ϕ -OTDR se obtuvieron cuando la fibra óptica estaba sin perturbaciones y cuando estaba con perturbaciones externas respectivamente, de tal forma que la comparación de estas trazas nos permite definir cómo el sistema responde ante la presencia de una tensión o presión externa en algún punto de la fibra. Como se ha comentado, dicha respuesta fue evaluada usando fibras ópticas con diferentes dopantes de GeO_2 en el núcleo de la fibra para estudiar y analizar los cambios en la respuesta del sistema para detectar vibraciones y otras perturbaciones externas.

ÍNDICE

CAPITULO 1 .	<i>Introducción</i>	2
1.1	Introducción	2
1.2	Conceptos teóricos fundamentales de la transmisión por fibras ópticas.	3
1.2.1	Fibra óptica	4
1.2.2	Teoría de propagación de la luz en fibras ópticas.	5
1.2.3	Fibras ópticas convencionales.....	7
1.2.4	Leyes de reflexión y refracción de la luz en fibras ópticas.....	7
1.3	Efectos lineales en la transmisión por fibras ópticas.	9
1.3.1	Absorción de la luz en fibras ópticas.....	10
1.3.2	Retro-esparcimiento de Rayleigh.....	10
1.3.3	Pérdidas por empalmes de fusión.	12
1.3.4	Pérdidas por curvaturas.....	12
1.3.5	Reflexión de Fresnel.....	14
CAPITULO 2 .	<i>Conceptos teóricos de un sistema ϕ-OTDR.</i>	16
2.1	Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR).	16
2.1.1	Principio de funcionamiento del OTDR convencional.....	19
2.2	Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (ϕ-OTDR).	21
2.2.1	Retroesparcimiento de Rayleigh en OTDR convencional y en ϕ -OTDR.	24
2.2.2	Coherencia de la fuente de luz.	26
2.2.3.	Interferencia entre dos ondas.	28
2.3	Análisis de los campos reflejados en OTDR convencional y ϕ-OTDR.	29
2.3.1	Comparación de trazas típicas de sistemas OTDR y ϕ -OTDR.....	33
2.3.2	Coefficiente de atenuación en trazas ϕ -OTDR.....	34
CAPITULO 3 .	<i>Simulación del sistema ϕ-OTDR con y sin perturbación en fibras ópticas convencionales.</i>	37
3.1	Generación de trazas ϕ-OTDR.	37
3.2	Coefficiente de reflexión en el sistema ϕ-OTDR.	39

3.3	Propiedades estadísticas y validación de las trazas ϕ-OTDR sin perturbación.	40
3.3.1	Trazas ϕ -OTDR sin perturbación obtenidas con puntos de espaciamiento ordenados uniformemente.	41
3.3.2	Trazas ϕ -OTDR sin perturbación obtenidas con puntos de espaciamiento ordenados aleatoriamente.	44
3.4.	Efectos ópticos en fibra ópticas útiles para el desarrollo de sensores.	46
3.4.1	Generación de trazas ϕ -OTDR con perturbación.	47
3.5	Simulación de trazas ϕ-OTDR con perturbación en fibras ópticas convencionales.	49
3.5.1	Sensibilidad del sistema ϕ -OTDR con puntos de espaciamiento ordenados uniformemente y coeficiente de reflexión aleatorio.	56
3.5.2	Sensibilidad del sistema ϕ -OTDR con puntos de espaciamiento ordenados aleatoriamente y coeficiente de reflexión dependiente del índice de refracción.	60
CAPITULO 4 . <i>Simulación de sistema ϕ-OTDR con y sin perturbación en fibras ópticas dopadas.</i>.....		63
4.1	Fibras ópticas dopadas $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$.....	63
4.1.1	Ecuación de Sellmeier en fibras ópticas dopadas.	64
4.2	Trazas ϕ-OTDR sin perturbación con fibras ópticas dopadas.	65
4.2.1	Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con fibras ópticas dopadas. Puntos de espaciamiento ordenados uniformemente.	66
4.2.2	Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con fibras ópticas dopadas. Puntos de espaciamiento ordenados aleatoriamente.	68
4.3	Trazas ϕ-OTDR con perturbación con fibras ópticas dopadas.....	70
4.3.1	Sensibilidad del sistema ϕ -OTDR con puntos de espaciamiento ordenados uniformemente y coeficiente de reflexión aleatorio.	72
4.3.2	Sensibilidad del sistema ϕ -OTDR con diferentes dopantes y puntos de espaciamiento ordenados uniformemente y coeficiente de reflexión dependiente del índice de refracción.	75
CAPITULO 5 . <i>Conclusiones y Recomendaciones</i>		81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		86
ANEXOS		87

LISTADO DE FIGURAS.

FIGURA 1.1. ESTRUCTURA DE UNA FIBRA ÓPTICA CONVENCIONAL MONOMODO SMF28....	4
FIGURA 1.2. REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ EN FIBRAS ÓPTICAS.....	8
FIGURA 1.3. ESPECTRO DE ATENUACIÓN TÍPICO DE UNA FIBRA ÓPTICA.....	9
FIGURA 1.4. PUNTOS DE ESPARCIMIENTO O IMPUREZAS QUE GENERAN ESPARCIMIENTO RAYLEIGH.....	12
FIGURA 1.5. PÉRDIDAS POR CURVATURA EN FIBRAS ÓPTICAS.....	13
FIGURA 2.1. DIAGRAMA Y FUNCIONAMIENTO DE UN OTDR CONVENCIONAL.....	17
FIGURA 2. 2 A) POTENCIA REFLEJADA POR ESPARCIMIENTO RAYLEIGH Y POR CONECTORES Y EMPALMES, Y B) GRÁFICA DE POTENCIA REFLEJADA (O TRAZA) DE UN OTDR CONVENCIONAL.....	18
FIGURA 2.3. COMPARACIÓN ENTRE LA RESOLUCIÓN DE LA TRAZA ΔZ Y RESOLUCIÓN DEL OTDR ΔD	21
FIGURA 2.4. DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA ϕ -OTDR.....	22
FIGURA 2. 5 A) TRAZA TÍPICA ϕ -OTDR SIN PERTURBACIÓN. B) TRAZA TÍPICA ϕ -OTDR CON PERTURBACIÓN.....	24
FIGURA 2.6. DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE ESPARCIMIENTO EN LA FIBRA ÓPTICA.....	25
FIGURA 2.7. COHERENCIA TEMPORAL DE LA FUENTE DE LUZ.....	26
FIGURA 2.8. COHERENCIA ESPACIAL DE LA FUENTE DE LUZ.....	27
FIGURA 2.9. INTERFERENCIA DE DOS ONDAS.....	28
FIGURA 2.10. CAMPOS REFLEJADOS POR PUNTOS DE ESPARCIMIENTO CON DISTRIBUCIÓN UNIFORME.....	29
FIGURA 2.11 CAMPOS REFLEJADOS POR PUNTOS DE ESPARCIMIENTO CON DISTRIBUCIÓN UNIFORME.....	30
FIGURA 2.12 TRAZA DE UN OTDR CONVENCIONAL.....	33
FIGURA 2.13 TRAZA DE UN ϕ -OTDR.....	34
FIGURA 2.14. CAMPOS REFLEJADOS POR PUNTOS DE ESPARCIMIENTO CON DISTRIBUCIÓN UNIFORME Y COEFICIENTE DE ATENUACIÓN α	35
FIGURA 2.15. CAMPOS REFLEJADOS POR PUNTOS DE ESPARCIMIENTO CON DISTRIBUCIÓN UNIFORME PARA UN SISTEMA ϕ -OTDR CONSIDERANDO LA ATENUACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA.....	35
FIGURA 3.1. REPRESENTACIÓN DEL ESQUEMA ϕ -ODTR A SIMULAR.....	38
FIGURA 3.2. GENERACIÓN DEL EJE HORIZONTAL PARA LA SIMULACIÓN DE TRAZAS ϕ -ODTR.....	40
FIGURA 3.3. PUNTOS DE ESPARCIMIENTOS ORDENADOS UNIFORMEMENTE.....	41

FIGURA 3.4. DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE PUNTOS DE ESPARCIMIENTO EN LA FIBRA ÓPTICA.	42
FIGURA 3.5. VALIDACIÓN DE TRAZAS ϕ -ODTR. A) TRAZA ϕ -ODTR EN AMPLITUD OBTENIDA CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS UNIFORMEMENTE, B) HISTOGRAMA DE AMPLITUD.	42
FIGURA 3.6. VALIDACIÓN DE TRAZAS ϕ -ODTR. B) FASE DE LA TRAZA ϕ -ODTR CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS UNIFORMEMENTE B) HISTOGRAMA DE FASE.	43
FIGURA 3.7. VALIDACIÓN DE TRAZAS ϕ -ODTR. A) TRAZA ϕ -ODTR EN POTENCIA OBTENIDA CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS UNIFORMEMENTE, B) HISTOGRAMA DE POTENCIA.	43
FIGURA 3.8. PUNTOS DE ESPARCIMIENTOS ORDENADOS ALEATORIAMENTE.	44
FIGURA 3.9. VALIDACIÓN DE TRAZAS ϕ -ODTR. A) TRAZA ϕ -ODTR EN AMPLITUD OBTENIDA CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS ALEATORIAMENTE, B) HISTOGRAMA DE AMPLITUD.	44
FIGURA 3.10. VALIDACIÓN DE TRAZAS ϕ -ODTR. B) FASE DE LA TRAZA ϕ -ODTR CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS ALEATORIAMENTE B) HISTOGRAMA DE FASE.	45
FIGURA 3.11. VALIDACIÓN DE TRAZAS ϕ -ODTR. A) TRAZA ϕ -ODTR EN POTENCIA OBTENIDA CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS ALEATORIAMENTE, B) HISTOGRAMA DE POTENCIA.	45
FIGURA 3.12. REPRESENTACIÓN DEL PROMEDIO DE TRAZAS ϕ -ODTR SIN PERTURBACIÓN Y CON PERTURBACIÓN, ASÍ COMO TAMBIÉN LA DIFERENCIA DE ESTOS PROMEDIOS DE TRAZAS PARA LOCALIZAR Y HACER VISIBLE LA PERTURBACIÓN.	48
FIGURA 3.13. PERTURBACIÓN APLICADA EN UN PUNTO DE LA FIBRA ÓPTICA.	50
FIGURA 3.14. PERTURBACIÓN APLICADA MEDIANTE VARIACIONES DE TENSIÓN Y TEMPERATURA.	51
FIGURA 3.15. TRAZA ϕ -ODTR DE AMPLITUD NORMALIZADA VS. LONGITUD DE LA FIBRA ÓPTICA CON $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$	52
FIGURA 3.16. TRAZA ϕ -ODTR. FASE ÓPTICA VS. LONGITUD DE LA FIBRA ÓPTICA CON $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$	523
FIGURA 3.17. TRAZA ϕ -ODTR. POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA VS. LONGITUD DE LA FIBRA ÓPTICA CON $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$	523
FIGURA 3.18. TRAZA ϕ -ODTR CON PERTURBACIÓN DE AMPLITUD ÓPTICA VS. LONGITUD DE LA FIBRA ÓPTICA.	524

FIGURA 3.19. TRAZA ϕ -ODTR CON PERTURBACIÓN DE FASE ÓPTICA VS. LONGITUD DE LA FIBRA	525
FIGURA 3.20. TRAZA ϕ -ODTR CON PERTURBACIÓN DE POTENCIA ÓPTICA VS. LONGITUD DE LA FIBRA ÓPTICA	525
FIGURA 3.21. CAMBIOS EN LA AMPLITUD DEL PICO DE LA PERTURBACIÓN DEBIDO A VARIACIONES DE Δn CAUSADOS POR TEMPERATURA Y TENSIÓN APLICADA EN UNA SECCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA.....	56
FIGURA 3.22. REPRESENTACIÓN DE LA VARIACIÓN DE POTENCIA ÓPTICA EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS DE Δn	528
FIGURA 3.23. REPRESENTACIÓN DE LA VARIACIÓN DE POTENCIA ÓPTICA EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS DE Δn	528
FIGURA 3.24. GRAFICA DE CAMBIOS DE POTENCIA DEL PICO DE PERTURBACIÓN EN FUNCIÓN DE Δn	58
FIGURA 3.25. PENDIENTES CON MAYOR INCLINACIÓN Y MENOR INCLINACIÓN DE LA CURVA DE CAMBIOS DE POTENCIA DEL PICO DE PERTURBACIÓN EN FUNCIÓN DE Δn ...	529
FIGURA 3.26. PENDIENTES CON MAYOR INCLINACIÓN Y MENOR INCLINACIÓN DE LA CURVA DE CAMBIOS DE POTENCIA DEL PICO DE PERTURBACIÓN EN FUNCIÓN DE Δn USANDO LA SIMULACIÓN MODIFICADA.	61
FIGURA 4.1. TRAZAS ϕ -OTDR SIN PERTURBACIÓN CON AMPLITUD ÓPTICA NORMALIZADA VS. LONGITUD DE FIBRA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES MOLARES DE GeO_2 Y CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS UNIFORMEMENTE. FRACCIÓN MOLAR DE GeO_2 : A) MF: 5%,B) MF: 20%.....	66
FIGURA 4.2. TRAZAS ϕ -OTDR SIN PERTURBACIÓN CON POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA VS. LONGITUD DE FIBRA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE GeO_2 Y CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS UNIFORMEMENTE. FRACCIÓN MOLAR DE GeO_2 : A) MF: 5%,B) MF: 20%.....	67
FIGURA 4.3. TRAZAS ϕ -OTDR SIN PERTURBACIÓN CON AMPLITUD ÓPTICA NORMALIZADA VS. LONGITUD DE FIBRA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES MOLARES DE GeO_2 Y CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS ALEATORIAMENTE. FRACCIÓN MOLAR DE GeO_2 : A) MF: 5% ,B) MF: 20%.	68
FIGURA 4.4. TRAZAS ϕ -OTDR SIN PERTURBACIÓN CON POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA VS. LONGITUD DE FIBRA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE GeO_2 Y CON PUNTOS DE ESPARCIMIENTO ORDENADOS ALEATORIAMENTE. FRACCIÓN MOLAR DE GeO_2 : A) MF: 5% ,B) MF: 20%.....	69

FIGURA 4.5. TRAZAS ϕ -OTDR DE AMPLITUD ÓPTICA NORMALIZADA VS. LONGITUD DE FIBRA ÓPTICA CON PERTURBACIÓN ENTRE 1000M Y 1002M. FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ : MF:20%.	71
FIGURA 4.6. FASE ÓPTICA (RAD) DE LAS TRAZAS ϕ -OTDR VS. LONGITUD DE FIBRA ÓPTICA CON PERTURBACIÓN ENTRE 1000M Y 1002M. FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ : MF:20%.	71
FIGURA 4.7 TRAZAS ϕ -OTDR DE POTENCIA ÓPTICA NORMALIZADA VS. LONGITUD DE FIBRA ÓPTICA CON PERTURBACIÓN ENTRE 1000M Y 1002M. FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ : MF:20%.	72
FIGURA 4.8. CAMBIOS DEL PICO DE POTENCIA DE LA PERTURBACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS DE Δn EN UNA FIBRA ÓPTICA DOPADA CON UNA FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 15% CORRESPONDIENTE A UN ÍNDICE PROMEDIO DE LA FIBRA DE $n = 1.4664$ Y COEFICIENTES DE REFLEXIÓN ALEATORIOS.	73
FIGURA 4.9. CAMBIOS DEL PICO DE POTENCIA DE LA PERTURBACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS DE Δn EN UNA FIBRA ÓPTICA DOPADA CON UNA FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 20% CORRESPONDIENTE A UN ÍNDICE PROMEDIO DE LA FIBRA DE $n = 1.4737$ Y COEFICIENTES DE REFLEXIÓN ALEATORIOS.	74
FIGURA 4.10. CAMBIOS DEL PICO DE POTENCIA DE LA PERTURBACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS DE Δn EN UNA FIBRA CON UNA FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 15% CORRESPONDIENTE A UN ÍNDICE PROMEDIO DE LA FIBRA DE $n = 1.4664$ Y COEFICIENTES DE REFLEXIÓN DEPENDIENTES DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN.	74
FIGURA 4.11. VALOR PROMEDIO DE LAS 8 CURVAS SIMULADAS PARA UNA FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 15% EN LA REGIÓN DE VALORES DE Δn DONDE SE ENCUENTRA LA CURVA ROJA DE LA FIGURA 4.10.	747
FIGURA 4.12. SENSIBILIDAD DEL SISTEMA ϕ -OTDR ANTE CAMBIOS DE Δn CAUSADO POR PERTURBACIONES EXTERNAS EN FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS CON FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 15% EN EL NÚCLEO DE LA FIBRA.	748
FIGURA 4.13. CAMBIOS DEL PICO DE POTENCIA DE LA PERTURBACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS DE Δn EN UNA FIBRA CON UNA FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 20% CORRESPONDIENTE A UN ÍNDICE PROMEDIO DE LA FIBRA DE $n = 1.4737$ Y COEFICIENTES DE REFLEXIÓN DEPENDIENTES DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN.	78
FIGURA 4.14. VALOR PROMEDIO DE LAS 8 CURVAS SIMULADAS PARA UNA FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 20% EN LA REGIÓN DE VALORES DE Δn DONDE SE ENCUENTRA LA CURVA ROJA DE LA FIGURA 4.13.	78
FIGURA 4.15. SENSIBILIDAD DEL SISTEMA ϕ -OTDR ANTE CAMBIOS DE Δn CAUSADO POR PERTURBACIONES EXTERNAS EN FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS CON FRACCIÓN MOLAR DE GEO ₂ DE 20% EN EL NÚCLEO DE LA FIBRA.	78

LISTADO DE TABLAS.

TABLA 3.1. VALORES DE Δn_T PARA CAMBIOS DE TEMPERATURA CADA 0.05°K (0.05°K-0.25°K).....	50
TABLA 3.2. VALORES DE Δn_T PARA CAMBIOS DE TEMPERATURA CADA 0.05K (0.3°K -0.5 K).	50
TABLA 3.3. VALORES DE Δn_T PARA CAMBIOS DE TEMPERATURA CADA 0.05°K (0.05°K-0.25°K) EL CUAL SE LE SUMA UN CAMBIO ADICIONAL Δn_ε CAUSADO POR UN ESFUERZO DE 6 $\mu\varepsilon$	51
TABLA 3.4. VALORES DE Δn_T PARA CAMBIOS DE TEMPERATURA CADA 0.05°K (0.3°K-0.5°K) EL CUAL SE LE SUMA UN CAMBIO ADICIONAL Δn_ε CAUSADO POR UN ESFUERZO DE 6 $\mu\varepsilon$	51
TABLA 4.1. COEFICIENTES DE SELLMEIER PARA SiO_2 Y GeO_2 UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO [27]......	65

Planteamiento del Problema

En el presente proyecto se plantea evaluar y optimizar el desempeño de un sistema ϕ -OTDR enfocándose en lograr mejoras en la sensibilidad basado en el empleo de fibras ópticas con diferentes concentraciones de dopantes. Cabe mencionar que en la literatura especializada no se ha trabajado la mejora de la sensibilidad de sistemas ϕ -OTDR usando fibras ópticas con diferentes dopantes en su núcleo.

Hipótesis

A partir del estudio y caracterización de los diferentes tipos de fibras ópticas dopadas y el análisis comparativo de su impacto en un sistema ϕ -OTDR, se podrán proponer mejoras en el diseño típico de estos tipos de sistemas basados inicialmente en el empleo de fibras ópticas estándar SMF28. Lo anterior permitirá encontrar nuevas rutas para incrementar la sensibilidad del ϕ -OTDR en la detección de vibraciones a lo largo de la fibra.

Objetivos

Analizar y optimizar el desempeño de un sistema ϕ -OTDR, empleando fibras ópticas dopadas, y con ello, incrementar la sensibilidad del sistema para detectar vibraciones a lo largo de la fibra.

Objetivos Particulares

- I. Estudiar el sistema ϕ -OTDR para conocer sus principales características y funcionamiento.
- II. Analizar cómo mejorar la sensibilidad de un ϕ -OTDR mediante fibras ópticas con diferentes dopantes.
- III. Caracterización de las diferentes fibras ópticas que se planean utilizar para mejorar el ϕ -OTDR.
- IV. Realizar un análisis comparativo del comportamiento del ϕ -OTDR con diferentes tipos de fibras y la caracterización de la sensibilidad del sistema.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Introducción

John Tyndall en 1870 descubrió que un haz de luz era capaz de viajar dentro de un material dieléctrico transformándolo en una línea de transmisión utilizando el fenómeno de reflexión total interna en las paredes, en este caso, utilizó el agua como medio de propagación de la luz. En los años siguientes se utilizaría este principio, pero sustituyendo el agua por un filamento de vidrio delgado de gran longitud denominado fibra óptica, que permitió la transmisión de luz para su empleo en comunicaciones a largas distancias. Este hecho, junto con el desarrollo de fuentes luz láser, sentaría las bases para el surgimiento de las comunicaciones ópticas.

En esa época no se contaban con materiales de vidrio de alta calidad que logran transmitir la luz con un rendimiento aceptable a lo largo de la fibra óptica. En ese sentido, se buscaba minimizar las pérdidas de transmisión de luz que provoca el vidrio. La introducción de mejoras en los procesos y métodos de fabricación de la fibra óptica permitió una reducción de estas pérdidas a valores asequibles de hasta 0.2 dB/km para longitudes de onda de 1550 nm. En forma paralela, con el desarrollo de láseres de semiconductores se hizo posible la transmisión eficiente de luz en fibras ópticas.

Desde entonces, la fibra óptica constituyó un elemento clave en la era de la información, comunicación y tecnología proporcionando alternativas rentables, fiables y con alto rendimiento en comparación a los enlaces de comunicación realizados con cable de cobre.

El avance vertiginoso del desarrollo de las fibras ópticas en telecomunicaciones y de sus sistemas ópticos de recepción y transmisión, ha despertado un gran interés para emplearlos también en el área de sensores distribuidos. Lo anterior se debe a que la fibra óptica se puede utilizar como un medio sensor en toda su longitud, pudiendo detectar cualquier tipo de perturbación externa ejercida en cualquier punto sobre la fibra óptica a través del monitoreo de los cambios de las propiedades de la luz que se transmite en el interior, los cuales son producidos justamente por dichas perturbaciones. Lo anterior ha generado el inicio de novedosas aplicaciones de la fibra óptica para la detección distribuida de vibraciones y tensiones que puedan provocar fracturas en estructuras civiles, oleoductos, acueductos y con ello prevenir fallas y rupturas.

Los sensores distribuidos de fibra óptica facilitan el monitoreo de una estructura de gran longitud con un solo equipo de medición debido a que se emplea toda la fibra como el elemento sensor, pudiendo detectar una vibración en cualquier punto de la fibra, ofreciendo una gran ventaja sobre los sensores puntuales convencionales que poseen múltiples conexiones y puntos de sensado imposibilitando el monitoreo en áreas con varios kilómetros de extensión.

El estudio de esta tesis comprende el análisis de un sistema de sensado distribuido basado en reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase, o por sus siglas en inglés ϕ -OTDR (Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer). En particular, se simulará la detección de una perturbación externa ejercida sobre la fibra óptica y se determinará la ubicación de dicha perturbación a lo largo de la fibra óptica [1, 2].

En un sistema ϕ -OTDR el láser emite pulsos de luz a lo largo de la fibra, y conforme el pulso de luz recorre la fibra óptica en su interior, las moléculas del material con que se fabrica la fibra, así como las impurezas o imperfecciones que hay en su interior, provocan un reflejo distribuido del pulso de luz, lo que genera un pulso de retroesparcimiento que se podrá detectar de nuevo al inicio del enlace de fibra.

La perturbación externa ejercida en algún punto de la fibra óptica genera un cambio en el material de la fibra y también provoca una reflexión del pulso con mayor amplitud y con una fase diferente lo cual se puede detectar con un procesamiento digital de señales en el receptor. También se puede conocer la posición donde la perturbación fue ejercida sobre la fibra tomando el tiempo en que se transmitió el pulso de luz y el tiempo de vuelta en que se ha detectado el pulso reflejado, y considerando la velocidad de la luz en la fibra óptica, se puede determinar a qué distancia ocurrió la vibración [3, 4].

Con el análisis de amplitud y fase del pulso reflejado se obtiene información de cómo el índice de refracción del material de la fibra fue deformado. En base a este principio se estudiarán un conjunto de parámetros que caracterizan a las fibras ópticas convencionales y dopadas, así como su impacto en el mejoramiento de la sensibilidad del sistema.

1.2 Conceptos teóricos fundamentales de la transmisión por fibras ópticas

La fibra óptica constituye un medio de transmisión de mucha fiabilidad que se emplea actualmente en redes de datos de sistemas de comunicaciones, y se puede visualizar como

un hilo delgado de material transparente (vidrio) capaz de transmitir pulsos de luz que representan datos.

La transmisión por fibras ópticas se basa en el principio de reflexión total interna, que se presenta cuando el núcleo de la fibra óptica presenta un índice de refracción (o densidad) ligeramente mayor al índice de refracción (o densidad) del revestimiento de la fibra. En esta condición, el haz de luz para poder guiarse en el interior del núcleo de la fibra debe propagarse incidiendo con un ángulo mayor que el ángulo crítico correspondiente en la interfaz núcleo-revestimiento de la fibra, haciendo con ello que toda la luz contenida se refleje en el interior de la fibra, en consecuencia, la luz se transmite a largas distancias reflejándose en el interior de la fibra óptica miles de veces [4]. A continuación, en la Figura 1.1 se presenta la descripción de la estructura de una fibra óptica convencional denominada SMF28 y se explica su funcionamiento a detalle.

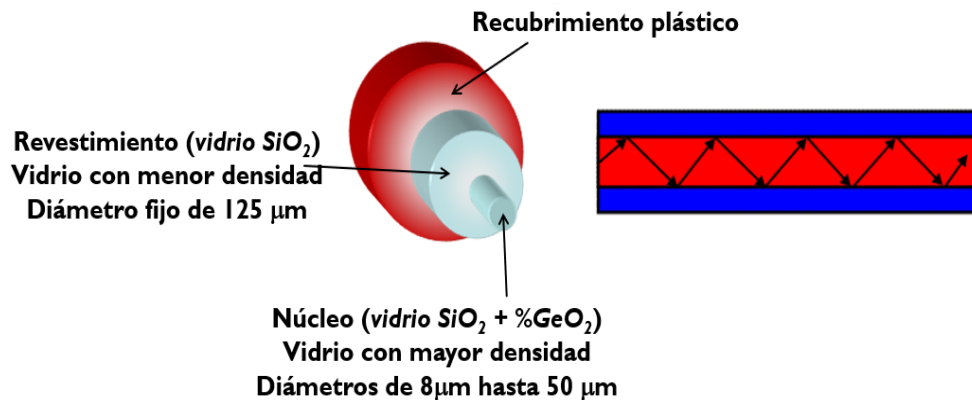


Figura 1.1. Estructura de una fibra óptica convencional monomodo SMF28.

1.2.1 Fibra óptica

La fibra óptica puede verse como una estructura de forma cilíndrica que consta de un núcleo central de vidrio sílice, también denominado dióxido de Silicio (SiO_2), que generalmente esta dopado con un pequeño porcentaje de dióxido de Germanio (GeO_2), y dicho núcleo está cubierto por un revestimiento concéntrico también de vidrio sílice, pero de densidad menor. En la fibra óptica, el índice de refracción del núcleo es ligeramente mayor al revestimiento [3-6]. Lo anterior es necesario para que ocurra el fenómeno de reflexión total

interna. Además, el haz de luz debe incidir en la interfaz núcleo-revestimiento con un ángulo mayor al ángulo crítico de la fibra óptica.

Para determinar este ángulo crítico se toman en cuenta ambos índices de refracción de la siguiente forma:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_r}{n_n}\right) \quad (1.1)$$

donde: n_r : índice de refracción del revestimiento, n_n : índice de refracción del núcleo.

En los sistemas de telecomunicaciones con fibras ópticas para asegurar que la luz se refleje internamente dentro de las paredes de la fibra óptica con un ángulo mayor al ángulo crítico, se procura introducir la luz dentro de la fibra con una apertura angular menor a θ . La función seno del ángulo de apertura θ nos indica la apertura numérica NA de la fibra óptica la cual está definida por la expresión matemática:

$$NA = \text{sen}\theta = \sqrt{n_n^2 - n_r^2} \quad (1.2)$$

Esta apertura numérica se puede encontrar en las hojas de especificaciones de cualquier tipo de fibra óptica comercial. Para fibras ópticas SMF28 comerciales, este valor es de $NA=0.14$.

Adicionalmente, existen dos tipos de fibras de acuerdo con el número de modos que se propaguen dentro de ellas; las fibras multimodo se caracterizan por diámetros de núcleo de 50 μm y diámetros de revestimiento de 125 μm mientras que las fibras monomodo tienen típicamente diámetros de núcleo de 9 a 10 μm y diámetros de revestimiento de 125 μm [7]. En este trabajo de investigación solo se considerarán fibras ópticas monomodo.

1.2.2 Teoría de propagación de la luz en fibras ópticas.

La luz que se transmite dentro del cable de fibra óptica no es más que una onda electromagnética con características similares a una onda de radio, la principal diferencia radica en que la longitud de onda de la luz transmitida es del orden de micrómetros en lugar de metros o centímetros como las que poseen las ondas de radio. Como principio básico, la luz queda confinada en el interior de la fibra y se transmite a la máxima velocidad posible, esto es posible debido a las leyes de refracción y reflexión de la luz [3, 4].

Para poder comprender el funcionamiento de un sistema ϕ -OTDR basado en fibras ópticas es necesario analizar los principios que rigen la propagación de la luz en fibras ópticas. En

este sentido, como la luz es una onda electromagnética, las ecuaciones de Maxwell permiten desarrollar y analizar este modelo de propagación:

$$\nabla_{\mathbf{x}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\sigma \vec{D}}{\sigma t} \quad (1.3)$$

$$\nabla_{\mathbf{x}} \vec{E} = -\frac{\sigma \vec{B}}{\sigma t} \quad (1.4)$$

$$\nabla_{\mathbf{x}} \vec{D} = \rho \quad (1.5)$$

$$\nabla_{\mathbf{x}} \vec{B} = 0 \quad (1.6)$$

En estas ecuaciones se utilizan los vectores del campo eléctrico y magnético definidos como \vec{E} y \vec{H} y los vectores de inducción magnética y desplazamiento eléctrico \vec{B} y \vec{D} [4].

Como la propagación de la onda electromagnética es a través de una fibra óptica entonces la densidad de corriente y carga \vec{J} y ρ tiene valor 0 debido a que el medio de transmisión es un dieléctrico.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (1.7)$$

Con la ecuación (1.7) se puede relacionar la inducción y el campo magnético a través de μ_0 que constituye la permeabilidad magnética en el vacío y \vec{M} la polarización magnética del medio que, en este caso al tratarse de la fibra óptica, éste constituye en sí un medio no magnético $\vec{M} = 0$. Por otro lado, también se cuenta con la siguiente relación:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.8)$$

De acuerdo a la ecuación (1.8) se puede relacionar el campo y el desplazamiento eléctricos a través de ϵ_0 que es la permitividad dieléctrica del vacío y \vec{P} que es la polarización lineal inducida por el campo en el medio definida como $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_L \vec{E}$, donde χ_L es la susceptibilidad eléctrica del material.

Empleando las ecuaciones (1.3) a (1.8) se puede obtener una ecuación de onda que rige la propagación de la luz en fibras ópticas:

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c^2} \frac{d^2 E}{dt^2} = 0 \quad (1.9)$$

Donde $n = \sqrt{1 + \chi_L}$, es el índice de refracción del material. En ese sentido, si a la ecuación de onda (1.9) se le sustituye un perfil de índices de refracción del núcleo y revestimiento, en donde el índice n_n del núcleo tiene un valor mayor al índice de refracción n_r del revestimiento, la ecuación de onda proporciona soluciones de ondas de luz que pueden propagarse dentro de la fibra óptica.

1.2.3 Fibras Ópticas convencionales.

Las fibras ópticas convencionales, como se ha comentado anteriormente, están constituidas por una estructura de sílice delgado donde el núcleo constituye la región de guiado por donde se transmite la luz. La composición del vidrio que conforma el núcleo se modifica mediante un dopaje durante el proceso de fabricación para lograr una diferencia entre ambos de tal forma que el índice de refracción del núcleo sea ligeramente mayor al del revestimiento ($n_{\text{núcleo}} > n_{\text{revestimiento}}$).

Como resultado de esta diferencia de índices refracción se observa el fenómeno de la reflexión total interna, en donde la luz que se propaga estará confinada dentro del núcleo de la fibra a lo largo de la transmisión.

Dentro de las fibras convencionales con una estructura más simple se encuentran las fibras ópticas con perfil escalonado como el mostrado en la Figura 1.1, con cambios abruptos en la interfase núcleo-revestimiento. Este tipo de fibras son las mayormente comercializadas en el mundo y se denominan SMF28. A su vez se tienen dos tipos de fibras ópticas de acuerdo con las características de la transmisión: a) Multimodo de índice escalonado, y b) monomodo de índice escalonado. Desde el punto de vista práctico la diferencia radica en el diámetro del núcleo. Luego se cuenta con las fibras de índice gradual con la característica de tener mayor complejidad, en este caso el valor máximo del índice de refracción se tiene en el eje central del núcleo y disminuye gradualmente hasta el revestimiento [3, 4].

1.2.4 Leyes de reflexión y refracción de la luz en fibras ópticas.

El núcleo y el revestimiento se componen de material de vidrio compuesto por dióxido de silicio, las impurezas son parte del proceso de fabricación para el dopaje y lograr que los índices de refracción núcleo y revestimiento sean diferentes. El índice de refracción del núcleo n_1 debe ser mayor al revestimiento n_2 como condición primordial para lograr confinar la luz en el interior de la fibra óptica.

En la reflexión, el rayo incidente y el reflejado se propagan en el mismo medio. La velocidad del rayo incidente y el reflejado es idéntica. Por otro lado, para que ocurra una refracción, la onda propagada en un medio pasa a otro medio con índice de refracción diferente y con diferente velocidad de propagación. Como consecuencia de esa distinta velocidad de propagación se produce una especie de “flexión” de la onda, que modifica su dirección de propagación.

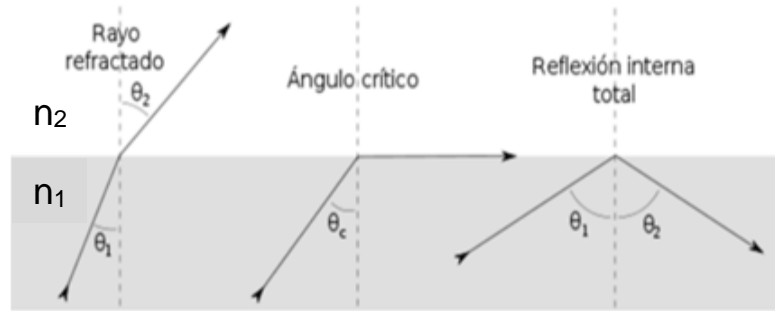


Figura 1.2. Reflexión y refracción de la luz en fibras ópticas.

En la Figura 1.2 se observa los fenómenos de reflexión y refracción de la luz en una fibra óptica. En el primer caso mostrado a la izquierda ejemplifica la refracción de la luz en donde un haz de luz incide sobre la superficie de un medio con un ángulo menor al ángulo crítico (definido en la Ecuación 1.1) y la luz transmitida se refracta con un ángulo θ_2 . El caso de en medio ejemplifica como el haz no atraviesa la interfaz entre diferentes medios si el haz de luz incidente posee un ángulo de incidencia igual al ángulo crítico, y el caso de la derecha ejemplifica la reflexión total interna la cual ocurre si el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico.

La ley de Snell establece la relación entre el índice de refracción, el ángulo de incidencia y el ángulo de salida del medio con respecto de la normal a la interface de la siguiente manera:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (1.10)$$

Conociendo los índices de refracción de los medios y el ángulo de incidencia se puede saber la dirección del haz refractado. Esto facilita el análisis de la luz en fibras ópticas debido a que para lograr el confinamiento de la luz el ángulo debe ser $\theta_2 > 90^\circ$.

El fundamento de la transmisión en fibras ópticas es que la luz incida sobre las paredes del revestimiento con un ángulo superior al límite o ángulo crítico, de este modo se puede alcanzar la condición de la reflexión total interna y la luz se confina completamente en el interior de la fibra con la menor cantidad de pérdidas posible.

1.3 Efectos lineales en la transmisión por fibras ópticas

La potencia de los pulsos de luz transmitidos a través de la fibra disminuye continuamente a medida que se propaga a lo largo de la fibra. Algunos de los principales mecanismos responsables de esta atenuación son el esparcimiento de Rayleigh, la absorción de impurezas, las imperfecciones como dobleces y curvaturas, y la absorción intrínseca [3, 5]. En la Figura 1.3 se observa una dependencia típica de las pérdidas presentes en una fibra óptica de sílice a diferentes longitudes de onda. También se muestra las pérdidas fundamentales debidas al esparcimiento de Rayleigh, y las pérdidas debidas a las absorciones en el ultravioleta e infrarrojo. Los picos en la atenuación de la curva se deben principalmente a la presencia de moléculas de agua en el vidrio de la fibra óptica.

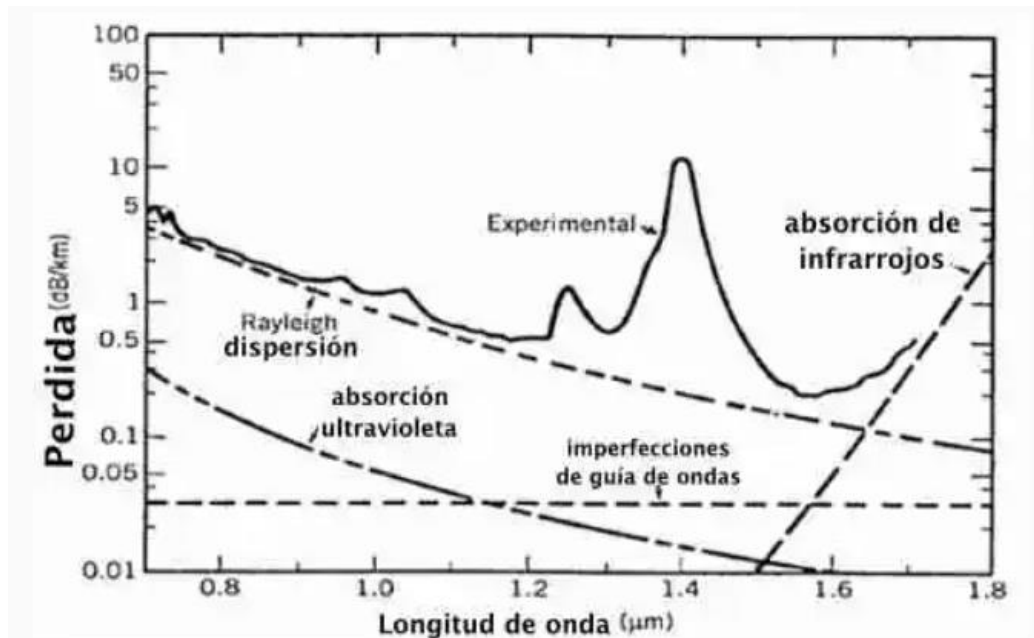


Figura 1.3. Espectro de atenuación típico de una fibra óptica [4].

De acuerdo a la Figura 1.3, las más bajas pérdidas de transmisión se encuentran alrededor de 1310 nm y 1550 nm. La presencia de impurezas en el agua produce un pico de absorción en la curva de atenuación alrededor de 1390 nm. Todo fenómeno que determine disminución de la potencia de la señal transmitida constituye atenuación o pérdida de la señal [4].

1.3.1 Absorción de la luz en fibras ópticas

La absorción de la luz en fibras ópticas forma parte de la atenuación intrínseca por los materiales propios de la fibra, debido a que en el proceso de fabricación se producen aglomeraciones moleculares o impurezas que no pueden ser eliminadas. Cuando la luz se transmite e interactúa con una impureza puede ser esparcida o absorbida.

La pérdida por absorción se produce cuando la luz procedente del pulso óptico transmitido es absorbida por el vidrio debido a las propiedades químicas o impurezas naturales que lo componen, transformándose en alguna forma de energía como el calor y representan entre un 3 y 5% de la atenuación de la fibra. Puede limitarse o disminuirse controlando la cantidad de impurezas dentro del proceso de fabricación, pero no puede ser eliminada por completo.

La potencia óptica transmitida en una fibra óptica depende de la cantidad de luz absorbida por el material, y esto se debe a las propiedades de dicho material y el volumen de interacción de la luz. La fibra puede estar expuesta a variaciones de temperatura en diversos segmentos de la transmisión, y la interacción de la luz en estos puntos se ve afectada por cambios de índice de refracción asociados a esas variaciones.

La absorción de la luz en fibras ópticas puede ser causada por tres diferentes formas:

1. Absorción por defectos moleculares en la composición del vidrio utilizado.
2. Absorción extrínseca por aglomeraciones moleculares o impurezas añadidas al vidrio.
3. Absorción intrínseca por la elección básica de átomos del material de la fibra.

Los defectos moleculares en la composición del vidrio son imperfecciones presentes en la estructura del material de la fibra como aglomeraciones moleculares extrañas, burbujas de oxígeno en la estructura del vidrio o aumento de la densidad del material en algún punto de la composición. La absorción de la luz por el material repercute en la atenuación de la señal óptica y su principal causante son las impurezas.

1.3.2 Retro-esparcimiento de Rayleigh

En este fenómeno, la luz al incidir sobre partículas o impurezas del vidrio menores al tamaño de la longitud de onda de la luz (~1550nm) se esparce en varias direcciones y se redirecciona en sentido contrario a la transmisión. Como resultado de este proceso se produce un reflejo de la luz cuando se propaga a lo largo de la fibra. Es importante señalar

que este efecto no esta asociado a reflexiones causadas por empalmes o conectores que se encuentran a lo largo de la fibra. Por otro lado, el esparcimiento de Rayleigh representa cerca del 96% de la atenuación de una fibra óptica.

En el núcleo de la fibra, la luz transmitida interactúa con las impurezas y partículas que componen el vidrio, lo cual provoca colisiones elásticas y como resultado un esparcimiento de Rayleigh. La luz reflejada, o retro-esparcida por este fenómeno lineal no tiene un cambio en frecuencia, y al no haber un cambio de la energía en los fotones se dice que es un proceso elástico [7].

Este esparcimiento o dispersión elástica, como se ha comentado, sucede cuando las fluctuaciones de densidad o imperfecciones son más pequeñas que la longitud de onda de la luz que se propaga dentro de la fibra y su pérdida se define con la siguiente expresión:

$$\alpha_R = \frac{C_R}{\lambda_4} \quad (1.11)$$

Las pérdidas por esparcimiento de Rayleigh son inversamente proporcionales a λ_4 esto quiere decir que para longitudes de onda más bajas será mayor el valor de la atenuación, y en donde C_R es un constante.

Cuando la luz es esparcida, ésta puede tomar diferentes direcciones, siendo una parte retro-esparcida, es decir, toma una dirección contraria al sentido de transmisión que llevaba. Dicho retro-esparcimiento de Rayleigh se emplea en los sistemas OTDR.

En la Figura 1.3 se observa como las pérdidas por retro-esparcimiento Rayleigh disminuyen a medida que aumenta la longitud de onda.

El retro-esparcimiento de Rayleigh es parte de la dispersión elástica y constituye un fenómeno sensible a las condiciones ambientales externas a la fibra óptica. Los cambios de amplitud en una traza debidos al retroesparcimiento de Rayleigh dan información de una perturbación o una vibración. Por lo tanto, este fenómeno se utiliza para la detección de eventos perturbativos sobre la fibra óptica.

En la Figura 1.4 se observan los puntos de esparcimiento que pueden estar presentes de manera aleatoria a lo largo de la fibra óptica [7]. Cuando el haz de luz incide sobre uno de estos puntos de esparcimiento, puede ocurrir dos cosas: el esparcimiento Rayleigh o absorción de la luz óptica transmitida. Ambos procesos devienen de una atenuación intrínseca o inherente en la fibra.

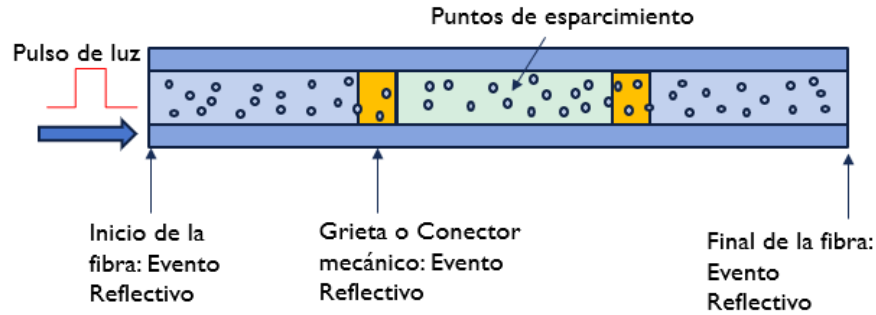


Figura 1.4. Puntos de esparcimiento o impurezas que generan esparcimiento Rayleigh.

En la Figura 1.3 se observan las pérdidas asociadas a estos procesos donde para la longitud de onda de 1550 nm se encuentran alrededor de 0.2 dB/Km. La potencia óptica $P(d)$ después de haber recorrido una distancia d viene dada por:

$$P(d) = P_i e^{-\alpha d} \quad (1.12)$$

Las pérdidas de potencia en la señal óptica en una distancia determinada son directamente proporcionales a la potencia óptica que se propaga por la fibra, donde d se refiere a la posición de la distancia de transmisión y α constituye el coeficiente de atenuación de la fibra óptica [7, 8].

1.3.3. Pérdidas por empalmes de fusión.

Cuando se empalma una fibra con otra, en la unión ocurre una pequeña variación del índice de refracción que genera reflexiones y refracciones de la luz transmitida, este factor unido a las aglomeraciones moleculares o impurezas presentes en la fibra determinan una pérdida o atenuación en ese punto.

Para hacer un empalme de fusión se alinean con precisión ambas fibras generando un pequeño arco eléctrico al soldarlas, esto se realiza por medio de una empalmadora de fusión y se logra una pérdida más baja. El empalme debe ser protegido con un mango protector para prevenir roturas y dar mayor seguridad [7].

1.3.4. Pérdidas por curvaturas.

Al aplicar una curvatura a la fibra se ocasiona un cambio o transición en la estructura, aplicando una tensión localizada en la región del doblé. Este efecto ocasiona una variación del índice de refracción y del ángulo crítico de la luz en esa zona específica, por lo que la

luz que viaja en el núcleo ya no cumple la condición de reflexión total interna y se escapa de la fibra, ocasionando una pérdida tal como se observa en la Figura 1.5.

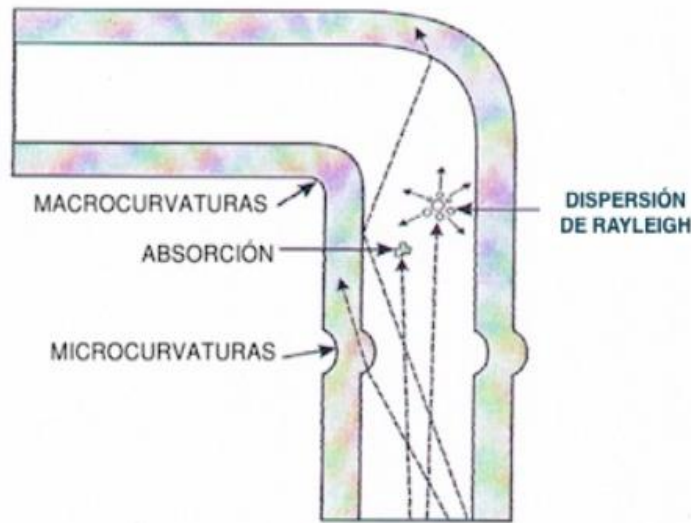


Figura 1.5. Pérdidas por curvatura en fibras ópticas [7].

El radio de curvatura mínimo que puede ser aplicado a una fibra óptica viene en sus hojas de especificaciones, y por lo general, para fibras ópticas convencionales no debe superar 1 cm de radio de curvatura. Este radio de curvatura mínimo determina la cantidad de flexión aplicado a la fibra para que no sufra daños o atenuación mayor.

La clasificación de las pérdidas por curvatura depende del radio de curvatura que tenga la fibra y pueden ser de dos tipos: a) macrocurvaturas, y b) microcurvaturas.

Las pérdidas por macrocurvaturas son debido a factores externos que influyen en la formación de curvaturas grandes en la fibra, esto ocasiona que los haces de luz logran escapar del núcleo perdiendo la condición de reflexión total interna superando el ángulo de incidencia máximo [9].

Las pérdidas por microcurvaturas son causadas por imperfecciones pequeñas (microscópicas) en la fibra debido al proceso imperfecto de fabricación y que afectan su geometría; un ejemplo de esto es los límites desiguales entre el núcleo y revestimiento, o cambios pequeños en el diámetro del núcleo de la fibra. Una torsión, tensión o presión aplicada en la fibra también pueden causar microcurvaturas.

1.3.5. Reflexión de Fresnel.

Las reflexiones de Fresnel ocurren en el límite entre dos materiales con diferente índice de refracción. En este sentido, se toma como ejemplo una interfaz entre aire con índice de refracción n_i y vidrio con índice de refracción n_t . Cuando la luz atraviesa dicha interfaz se refleja una porción de la luz la cual está determinada por el coeficiente de reflexión de Fresnel “ R ”, mientras que otra porción de la luz es transmitida, la cual está determinada por el coeficiente de transmisión “ T ”. Las expresiones de dichos coeficientes vienen dadas por:

$$R = \left[\frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \right]^2 \quad (1.13)$$

$$T = \left[\frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \right]^2 \quad (1.14)$$

Donde θ_i es el ángulo de incidencia que tiene la luz al llegar a la interfaz, y θ_t es el ángulo transmitido que tiene la luz al atravesar la interfaz.

En el caso cuando $\theta_i = 0$, que corresponde al caso cuando la luz llega totalmente de frente, o perpendicularmente a la interface, el valor del coeficiente de reflexión de Fresnel se expresa como:

$$RF\% = \left[\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right]^2 \times 100 \quad (1.15)$$

En el caso de una interfaz vidrio/aire con un índice de refracción del aire $n_t = 1$ y un índice de refracción del vidrio de $n_i = 1.48$ se tiene un valor de $RF = 3.7\%$. La expresión anterior es válida cuando el corte del extremo de la fibra óptica es perfectamente perpendicular. De lo contrario, la reflexión disminuye casi a 0% cuando el ángulo de incidencia llega a 6°. Para disminuir esta reflexión se suele colocar un medio adaptador de índice de refracción [10].

Para lograr la comprensión del funcionamiento de un sistema de ϕ -OTDR resulta necesario conocer las características de una fibra óptica y como ocurre la propagación de la luz en este medio; además de evaluar los efectos lineales que influyen en la transmisión como el esparcimiento o dispersión de Rayleigh que constituye el fenómeno principal para el desarrollo de numerosas aplicaciones de sensado distribuido en especial el sistema que nos acontece. En este contexto, en el presente capítulo introductorio se ha expuesto los

principios básicos de la transmisión de luz por fibras ópticas y los factores fundamentales que influyen o determinan su desempeño.

CAPÍTULO 2

Conceptos Teóricos de un sistema ϕ -OTDR.

La fibra óptica no es perfectamente homogénea, ya que tiene fluctuaciones de densidad microscópicas o impurezas en toda su extensión, y la luz que viaja en el interior de la fibra al incidir sobre estas partículas o impurezas se esparce en todas direcciones. La luz retro-esparcida describe las características del esparcimiento de Rayleigh siempre y cuando el tamaño de las partículas o impurezas sea menor a la longitud de la onda de luz transmitida. Este fenómeno es utilizado en los sistemas de detección distribuidos en donde se monitorea las propiedades de la luz retro-esparcida (reflejada) a lo largo de toda la fibra, permitiendo usarla como un sensor en toda su extensión. Este aspecto ha facilitado la introducción de sensores distribuidos con fibras ópticas que detectan las perturbaciones externas y cambios de temperatura en cualquier punto de la fibra óptica los cuales provocan un cambio en las propiedades de la luz retro-esparcida, con potenciales aplicaciones en el monitoreo de estructuras civiles, petróleo y gas [8]. En este capítulo se proporciona una visión general de un sistema de sensado distribuido tipo OTDR sensible a la fase (ϕ -OTDR).

2.1 Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR).

Primero se comienza describiendo al reflectómetro óptico en el dominio del tiempo convencional (OTDR), y cuyas siglas se refieren a su nombre en inglés (Optical Time Domain Reflectometer). El OTDR es un sistema de interrogación que permite analizar parámetros de la luz retro-esparcida y las características de atenuación de las fibras ópticas. La técnica consiste en el envío de un pulso óptico corto e intenso con una duración determinada a lo largo de una longitud específica de fibra óptica. Como se ha comentado antes, la luz que se propaga experimenta un esparcimiento de Rayleigh. Una parte de la luz esparcida es recapturada por el núcleo de la fibra en la dirección de regreso y guiada hacia un fotodetector que se encuentra al inicio de la fibra. Con dicha técnica, el OTDR logra determinar las características de pérdidas y atenuación que presenta la fibra en todo lo largo de su longitud mediante el análisis de la potencia de luz retro-dispersada de Rayleigh detectada en el fotodetector en diferentes instantes de tiempo [8, 9, 11].

Con esta técnica también se evalúa las pérdidas por empalmes o conectores mecánicos que se encuentran a lo largo de un enlace de fibra permitiendo localizar fallas en una línea de transmisión óptica.

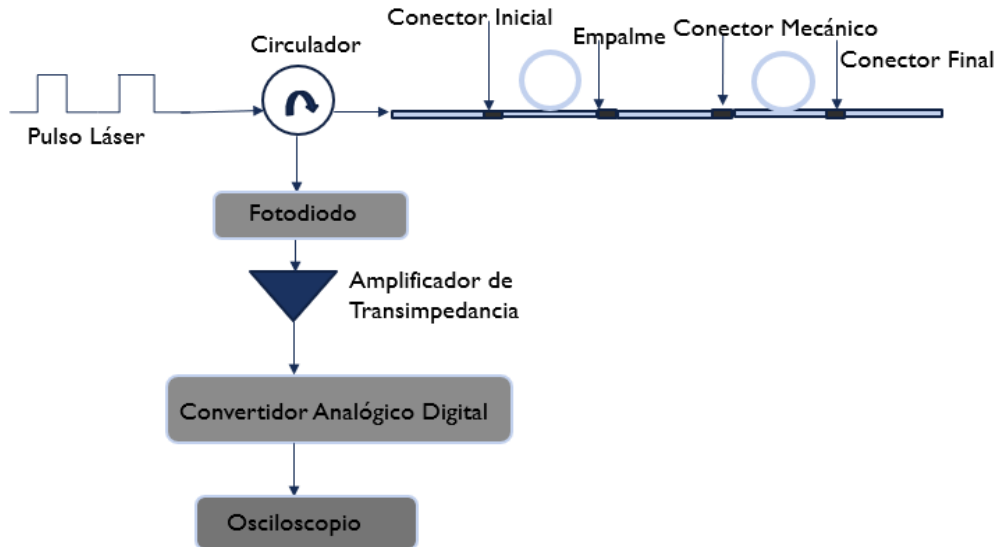


Figura 2.1. Diagrama y funcionamiento de un OTDR convencional.

En la Figura 2.1 se observa el diagrama general de un OTDR convencional donde se aprecia cómo se introducen pulsos de luz en la fibra óptica a través de un circulador. Conforme los pulsos de luz se transmiten a lo largo de la fibra óptica, pequeñas porciones del pulso se reflejan por causa del retro-esparcimiento Rayleigh y otras porciones del pulso se reflejan debido a conectores y empalmes mecánicos y de fusión, o por fisuras que se encuentran a lo largo de la fibra. Todas estas reflexiones son recibidas por el circulador que se ve en la entrada de la fibra óptica y los redirige hacia un fotodetector. Luego, por medio de este fotodetector compuesto por un fotodiodo, un amplificador de transimpedancia y un osciloscopio, se analizan las gráficas de potencias reflejadas (trazas) obtenidas las cuales servirán para determinar finalmente las pérdidas de potencia lumínica que presenta el pulso de luz cuando atraviesa toda la fibra óptica en la dirección de transmisión. En este sentido, el OTDR evalúa la pérdida distribuida a lo largo de la fibra en una determinada distancia en tiempo real.

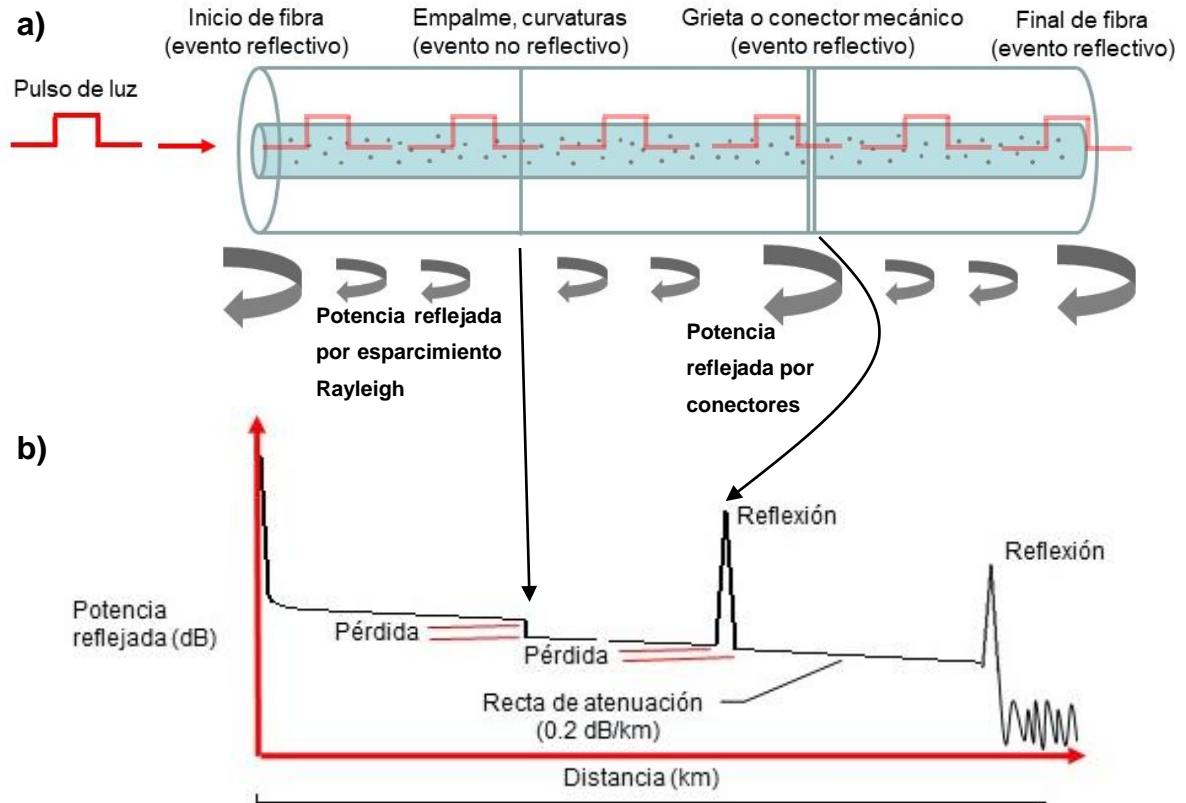


Figura 2.2. a) Potencia reflejada por esparcimiento Rayleigh y por conectores y empalmes, y b) Gráfica de potencia reflejada (o Traza) de un OTDR convencional.

En el ODTR convencional se utiliza como fuente de luz un láser con baja coherencia cuya descripción matemática del campo eléctrico es la siguiente: $E = |E|e^{i\phi}$. En esta expresión se observa una amplitud $|E|$ bastante conocida y controlada, pero con una fase ϕ inestable y muy variante en el tiempo. Los pulsos producidos por este láser y transmitidos a través de la fibra óptica se reflejan en un pequeño porcentaje debido a las partículas e impurezas que se encuentran a lo largo de la fibra óptica generando un retro-esparcimiento Rayleigh tal como se indica en la Figura 2.2 a). Esta pequeña porción de luz reflejada o retro-esparcida, aunque también posee una amplitud conocida, su fase sigue siendo inestable y muy variante en el tiempo.

En la Figura 2.2 b) se muestra el comportamiento de toda la potencia reflejada por el esparcimiento Rayleigh y por conectores y empalmes a lo largo de la fibra óptica, lo cual se denomina una traza del OTDR, en donde el eje Y corresponde a la potencia de la señal

(dB) retro-esparcida y el eje X describe la distancia recorrida por la luz. En estas trazas se puede observar como una grieta o conector mecánico determina un evento reflectivo, pero empalmes y curvaturas describen eventos no reflectivos que son pérdidas en la potencia de la señal transmitida. En el final de la fibra se pueden detectar por medio de la reflexión de Fresnel una rotura o un extremo de una fibra indicando un cambio abrupto de índice de refracción de vidrio a aire [11].

Los eventos reflectivos como grietas y conectores mecánicos generan una mayor reflexión detectándose un pico con un posterior descenso debido a que la luz que retorna procedente de puntos más adelantados experimentará una atenuación equivalente a la vuelta.

2.1.1 Principio de funcionamiento del OTDR convencional.

Tal como se ha comentado anteriormente, el láser emite un pulso de luz con una determinada longitud de onda y este pulso de luz se transmite a lo largo de la fibra. A medida que el pulso de luz se desplaza por la fibra, parte de la luz transmitida se refleja o se retro-esparce por la fibra hacia el fotodetector del OTDR que se encuentra al inicio de la fibra. La intensidad de esta luz de retorno y el tiempo que esta tarda en volver al detector indican el valor de la potencia reflejada por retro-esparcimiento, así como también el tipo y la ubicación de un evento en el enlace de la fibra óptica. Para evaluar el desempeño del OTDR se utilizan algunos parámetros como: el rango dinámico y la resolución espacial.

El rango dinámico se define como la diferencia entre el nivel máximo de potencia de la señal óptica al inicio de la fibra óptica y el ruido de fondo sin señal óptica. El rango dinámico del sistema puede mejorarse de dos maneras, una es incrementando la potencia de la luz retro-esparcida por el efecto Rayleigh y la otra es reduciendo el nivel de ruido. Por otro lado, con el tiempo total de ida y vuelta del pulso de luz reflejado (t) y la velocidad de la luz en la fibra óptica (v) se obtiene información de la longitud de la fibra analizada (l) mediante la siguiente expresión:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{2l}{t} \quad (2.1)$$

Donde c corresponde a la velocidad de la luz en el vacío $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Con la frecuencia de muestreo del convertidor analógico-digital del detector (f_s) se puede definir la resolución de la traza en el tiempo o en el espacio ($\Delta t, \Delta z$), donde Δt representa la

resolución temporal de la traza y Δz es la **resolución espacial de la traza**. Teniendo estos parámetros en cuenta, y de acuerdo a la Ecuación 2.1, se puede usar la siguiente expresión:

$$v = \frac{2\Delta z}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Entonces, la resolución espacial Δz se define por la expresión:

$$\Delta z = v \frac{\Delta t}{2} = \frac{c}{n} \frac{\Delta t}{2} \quad (2.3)$$

Como ejemplo, consideremos una frecuencia de muestro del fotodetector dada por $f_s = 0.5 \text{ Gsample/s}$. Con este dato podemos obtener una resolución temporal de $\Delta t = 1/f_s = 2 \text{ ns}$, y si usamos la Ecuación 2.3 podemos calcular la resolución espacial de la traza: $\Delta z = 20 \text{ cm}$, usando para dicho calculo un índice de refracción del núcleo de la fibra de $n = 1.45$.

Por otro lado, introducimos el concepto de **resolución del OTDR** (Δd), el cual puede determinarse también a partir de la Ecuación 2.1 empleando el ancho del pulso de luz láser τ .

$$v = \frac{c}{n} = \frac{2\Delta d}{\tau} \quad (2.4)$$

Para entender en forma gráfica la diferencia entre la resolución espacial de la traza (Δz) y la resolución espacial del OTDR (Δd) se puede observar la Figura 2.3. Es importante mencionar que Δz debe ser menor a Δd . De acuerdo a la Ecuación 2.4, si se usa un ancho de pulso de $\tau = 10 \text{ ns}$, entonces $\Delta d = 1 \text{ m}$ respectivamente.

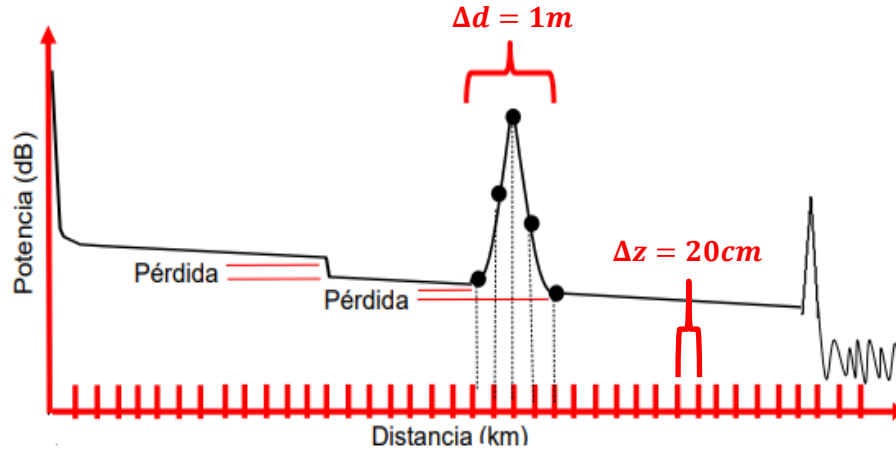


Figura 2.3. Comparación entre la resolución de la traza Δz y resolución del OTDR Δd .

En la Figura 2.3 se observa como la resolución del OTDR (Δd) permite detectar reflejos del orden de $1m$, pero para determinar la forma correcta de este pico de potencia reflejada se requiere tener una resolución de la traza Δz menor a Δd . En el presente ejemplo $\Delta z = 20cm$ y permite medir la forma del pico de potencia reflejando en al menos 5 puntos dentro de la resolución del OTDR de $\Delta d = 1m$ respectivamente.

En un OTDR no basta con solo enviar un pulso de luz a través de la fibra óptica, se requieren enviar varios pulsos de luz con una frecuencia de repetición o periodo temporal de repetición específico. Cada pulso de luz genera una traza de reflexión óptica como el de la Figura 2.3, y todas estas trazas se promedian para obtener una traza final. Cuando se envía un pulso de luz a recorrer la fibra óptica, el tiempo que demora en regresar el último reflejo del pulso causado por el extremo final de la fibra óptica, es el tiempo que se debe esperar para enviar el siguiente pulso de luz a través de la fibra. A este tiempo se le conoce como $t_{round-trip}$ y se define por la siguiente expresión:

$$t_{round-trip} = \frac{2l}{c/n} \quad (2.5)$$

La frecuencia de repetición f_r de los pulsos de luz transmitidos es inversamente proporcional a este tiempo, y su expresión está dada por:

$$f_r \leq \frac{1}{t_{round-trip}} \quad (2.6)$$

Con la Ecuación 2.6 se puede determinar la máxima frecuencia de repetición de pulsos que debe tener el tren de pulsos ópticos cuando se envían a una fibra óptica de longitud l .

2.2 Sistema de reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (ϕ -OTDR).

Los sistemas OTDR convencionales utilizan luz incoherente para analizar la pérdida o variaciones de potencia óptica transmitida y reflejada a lo largo de una fibra óptica. Lo anterior no ocurre en un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo sensible a la fase ϕ -OTDR o por sus siglas en inglés (Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer), en donde se utiliza como fuente de luz un láser altamente coherente.

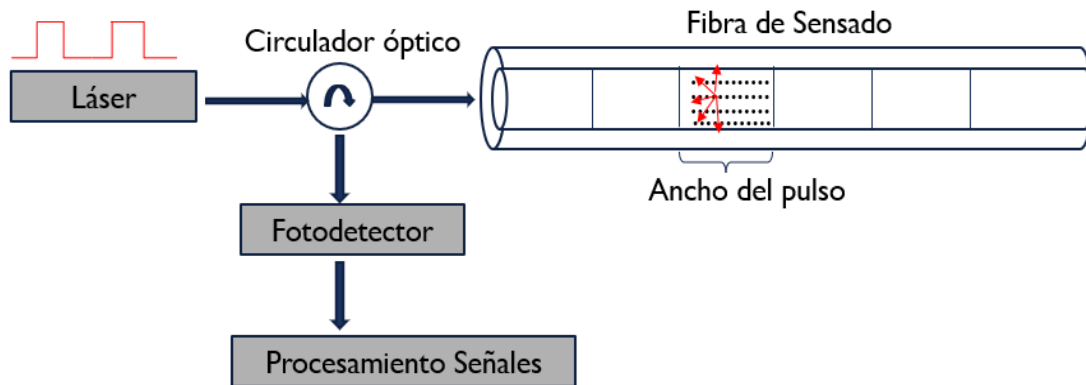


Figura 2.4. Diagrama general del sistema ϕ -OTDR.

En la Figura 2.4 se presenta un diagrama general del sistema ϕ -OTDR que consta de un láser coherente, un circulador óptico, un fotodetector para la detección de las trazas, la fibra óptica de sensado y un dispositivo de procesamiento de señales para analizar la información de la potencia reflejada.

En el ODTR sensible a la fase, o ϕ -OTDR, se utiliza como fuente de luz un láser con alta coherencia la cual puede ser también descrita matemáticamente con la siguiente expresión: $E = |E|e^{i\phi}$, en donde se tiene una amplitud $|E|$ bastante conocida y controlada, y una fase ϕ también bastante conocida y estable en el tiempo [12]. Una vez transmitido el pulso óptico por la fibra óptica, este interactuará con las aglomeraciones moleculares partículas, e imperfecciones que se observan en la Figura 2.4, lo cual generará una pequeña porción de luz reflejada por retro-esparcimiento Rayleigh. En este punto ocurre un fenómeno de interferencia entre dos ondas debido a que la porción del pulso reflejado interfiere de forma coherente con una porción del pulso óptico que se sigue transmitiendo a través de la fibra. Es importante mencionar que la interferencia óptica ocurre principalmente entre dos ondas

coherentes, y como el pulso de luz transmitido y la pequeña porción de luz reflejada por esparcimiento Rayleigh son coherentes, entonces esta interferencia es mucho más notoria en el sistema ϕ -OTDR en cada punto a lo largo de la fibra óptica en comparación con el OTDR convencional. Prácticamente, en un OTDR convencional no se alcanzan a detectar interferencias. Estas diferencias entre un ϕ -OTDR y un OTDR tradicional son de gran relevancia debido a que un cambio en las condiciones normales de un punto de la fibra causadas por cambios de temperatura o tensión asociadas a una perturbación externa a la fibra ocasionará una variación en el índice de refracción en ese punto de la fibra y por ende un cambio en la fase del pulso transmitido y reflejado, provocando que el valor de la interferencia óptica se modifique en dicho punto. Como el ϕ -OTDR puede registrar estas interferencias de luz, entonces es posible detectar indirectamente estas perturbaciones externas al monitorear los cambios que sufre la interferencia óptica en el punto donde se aplicó la perturbación, sin embargo, como el OTDR convencional no puede registrar estas interferencias ópticas debido a que usa láseres de baja coherencia, entonces difícilmente podrá registrar cambios de interferencias ópticas causadas por dichas perturbaciones externas.

En la Figura 2.5 inciso a) se observan en forma pictórica una traza de un sistema ϕ -OTDR, en donde se observa las oscilaciones de potencia reflejada correspondientes a las interferencias de los pulsos transmitidos y reflejados en cada punto de la fibra óptica, los cuales variarán alrededor de la potencia reflejada promedio, aspecto característico de una traza ϕ -OTDR. La amplitud de las oscilaciones y la potencia media reflejada disminuyen exponencialmente a lo largo de la fibra debido a la atenuación típica de la fibra óptica, pero la interferencia se mantiene con una visibilidad específica. La sensibilidad del ϕ -OTDR depende principalmente de la visibilidad de las interferencias.

En la Figura 2.5 inciso b) se indica cómo se visualiza la perturbación en una traza ϕ -OTDR después de ser procesada, y en donde también se observa un aumento de la potencia óptica reflejada en el punto de la longitud de la fibra donde ocurrió una perturbación externa. Las mejoras en la sensibilidad del sistema ϕ -OTDR ayudan en la detección de perturbaciones incluso con mínimos cambios de índice de refracción.

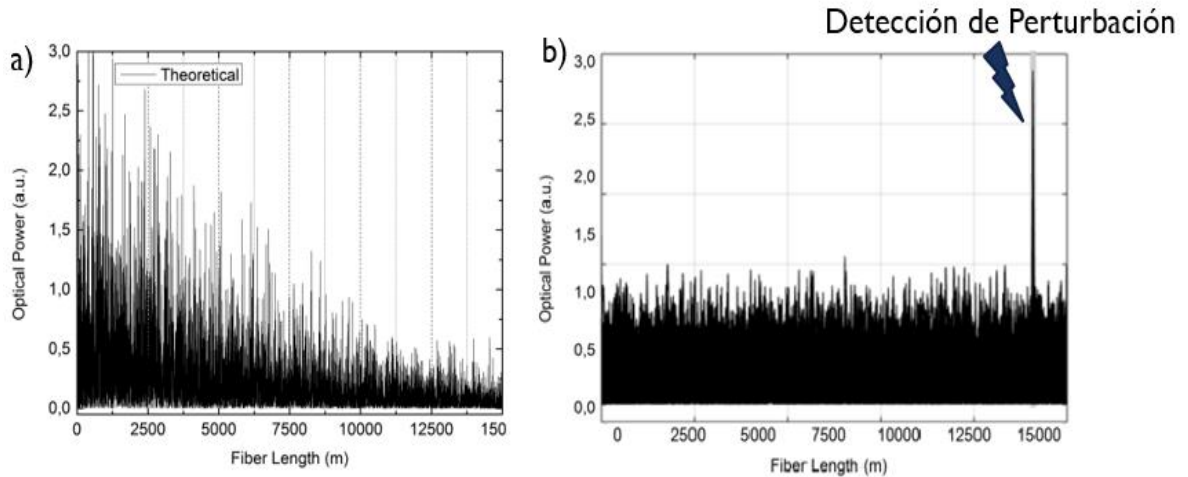


Figura 2.5. a) Traza típica ϕ -OTDR sin perturbación. b) Traza típica ϕ -OTDR con perturbación [3].

2.2.1 Retro-esparcimiento de Rayleigh en OTDR convencional y ϕ -OTDR.

En un sistema ϕ -OTDR se inyecta a la fibra óptica un pulso de alta coherencia para lograr que las pequeñas porciones del pulso de luz reflejadas desde los diferentes puntos de esparcimiento interfieran coherentemente con el mismo pulso transmitido. Lo anterior produce en la gráfica de la traza una serie de interferencias que ocurrieron en cada punto de la fibra [12, 13]. La interferencia óptica en cada punto de la fibra es sensible a las fases relativas correspondientes a los haces reflejados por los puntos de esparcimiento en una región de la fibra. Las trazas constituyen variaciones alrededor del valor de potencia promedio reflejada.

Cuando ocurre una perturbación las fases relativas de los pulsos reflejados y transmitidos varían en esa posición o punto de la fibra donde ocurre la tensión o perturbación, esto hace que la interferencia resultante en dicho punto sea distinta a la interferencia óptica en dicho punto cuando no hay perturbación.

El tamaño de la imperfección es menor a la longitud de onda del pulso de luz, es decir, si se usa una fuente láser de 1550nm, entonces la imperfección debe ser menor a 1550nm, este aspecto aplica también para la separación entre las imperfecciones. La luz al interactuar con las imperfecciones o aglomeraciones moleculares de la fibra puede escaparse de la fibra o reflejarse.

Antes de comenzar con el tratamiento teórico del funcionamiento del sistema ϕ -OTDR primero se considera una fibra óptica libre de empalmes o conectores mecánicos, de este modo solo se analizan los reflejos causados puramente por impurezas e imperfecciones de la fibra óptica, conocidos como puntos de esparcimiento de la luz. Es decir, solamente se consideran los reflejos causados por el esparcimiento Rayleigh.

En la Figura 2.6 se observan las formas en las que se pueden presentar la distribución de los puntos de esparcimiento en la fibra óptica. Por simplicidad, los puntos de esparcimiento son ordenados en una sola dimensión. Cabe recordar que la separación entre imperfecciones no debe superar la longitud de onda del pulso transmitido.

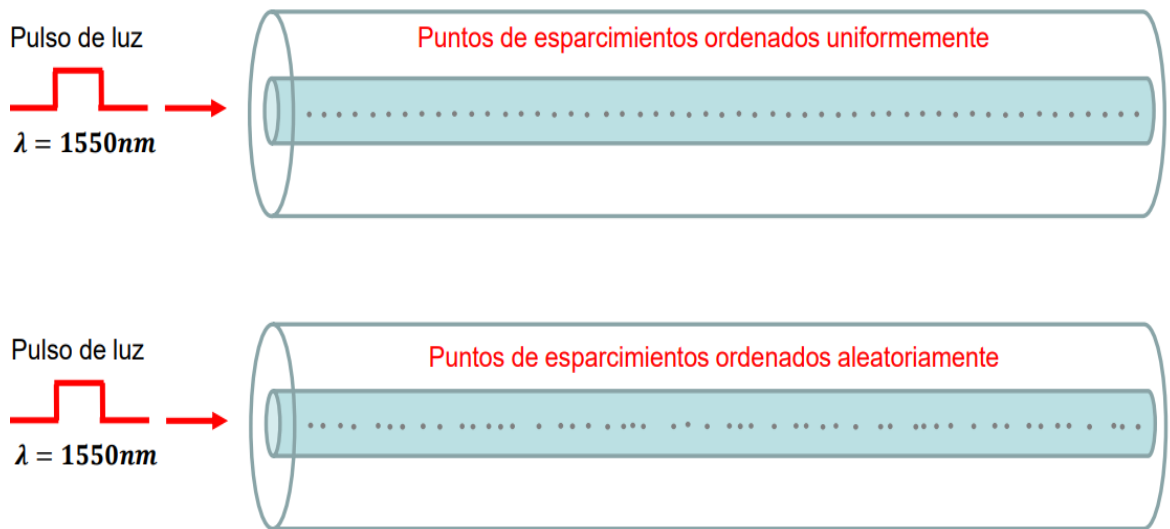


Figura 2.6. Distribución de puntos de esparcimiento en la fibra óptica.

Una vez descritos como se pueden ordenar los puntos de esparcimiento de una fibra óptica para analizar teóricamente los reflejos de luz causados por esparcimiento Rayleigh, ahora se procede a describir en que consiste la coherencia de la luz utilizada en el ϕ -OTDR, y como esta coherencia permite el fenómeno de interferencia entre la porción del pulso de luz reflejado y el pulso transmitido.

2.2.2 Coherencia de la fuente de luz.

La coherencia temporal de la luz se define como el tiempo de estabilidad donde un pulso de luz mantiene aproximadamente constante su fase en las distintas componentes frecuenciales [14, 15].

La luz natural es un ejemplo de luz no coherente debido a que emite fotones que se irradian de forma independiente con diferentes frecuencias y fases, por lo que no se puede determinar la fase de la onda en un instante de tiempo determinado.

Para considerar una fuente de luz coherente las ondas transmitidas deben estar en fase unas con otras, es decir, las crestas y valles de las ondas de luz deben estar alineados, así como también la forma de la onda debe ser periódica con un comportamiento predecible en tiempo y posición.

Puede existir además la luz cuasi coherente donde no se puede determinar la fase en todo el tiempo, pero si en un intervalo de tiempo específico como se indica en la Figura 2.7. A este intervalo de tiempo se le conoce como tiempo de coherencia τ_c [14].

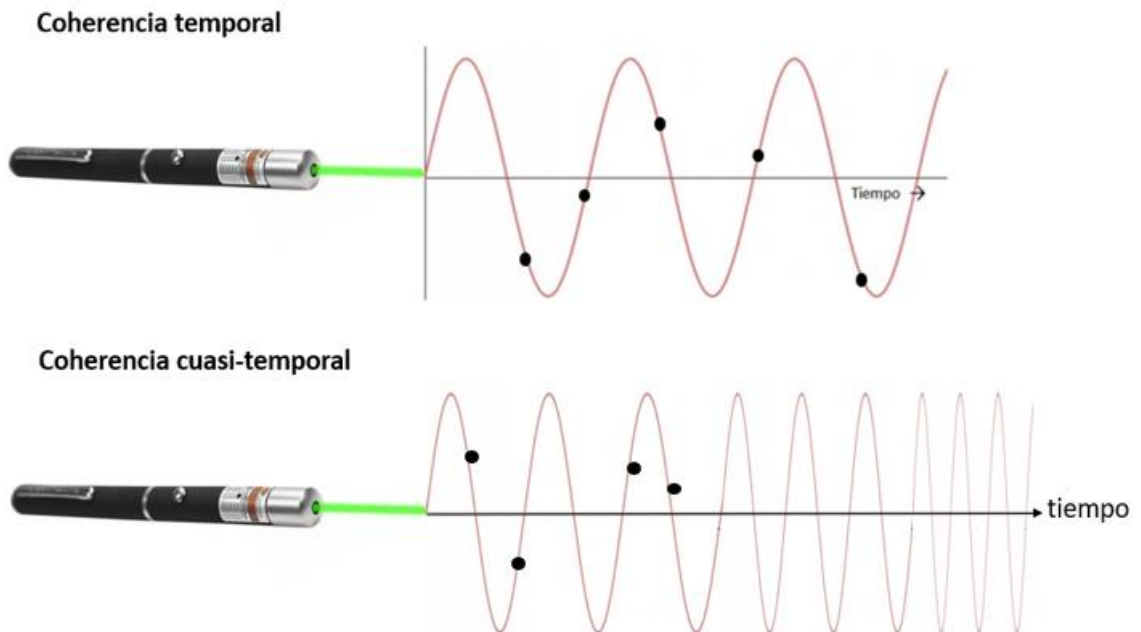


Figura 2.7. Coherencia temporal de la fuente de luz.

El tiempo de coherencia τ_c también tiene asociado una longitud de coherencia l_c o longitud máxima en la que una onda mantiene una fase estable y bien comportada. Dentro de la longitud de coherencia pueden viajar diferentes haces de luz y mantener una determinada coherencia entre ellos. La longitud de coherencia se puede calcular con la velocidad de la luz c de la siguiente manera:

$$l_c = c\tau_c \quad (2.7)$$

Se considera una luz coherente cuando l_c es mayor a la distancia que la luz va a viajar dentro de una fibra óptica o espacio libre.

En los sistemas ϕ -OTDR se necesita que el láser sea altamente coherente, por lo que se requiere un tiempo de coherencia grande para que su longitud de coherencia supere la extensión de la fibra óptica que se va a utilizar. Como ejemplo, un láser con un ancho espectral de 1MHz presenta un tiempo de coherencia de $1\mu\text{s}$ y de acuerdo a la Ecuación 2.7, este tiene una longitud de coherencia de 300m. El sensado ϕ -OTDR requiere que la interferencia entre los pulsos ópticos transmitidos se logre y para ello el láser debe tener un tiempo de coherencia mayor a la longitud de la fibra óptica que se pretende monitorear [14].

Por otro lado, la fuente de luz puede tener una coherencia espacial que se define por tener una fase constante en todo el espacio. Esto hace que entre dos puntos del espacio la diferencia de fase sea constante en el tiempo, tal como se indica en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Coherencia espacial de la fuente de luz.

Como se observa en la Figura 2.8 se puede conocer la fase de la onda en cualquier punto en el espacio. Una fuente puntual es coherente espacialmente, pero no necesariamente es coherente temporalmente.

Para el desarrollo de este proyecto resulta de vital importancia que la fuente de luz tenga una coherencia temporal. Generalmente las fuentes láser con coherencia temporal pueden ser descritas con la siguiente expresión:

$$E = |E|e^{i\omega_0 t} \quad (2.8)$$

Donde la frecuencia temporal está definida como: $\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0} = 2\pi \cdot \nu_0$. El ancho espectral de la fuente de luz son las variaciones que puede tener la frecuencia temporal ν_0 y esta definida por $\Delta\nu_0$. En primera instancia, se puede calcular el tiempo de coherencia con el inverso del ancho espectral: $\tau_c = 1/\Delta\nu_0$ respectivamente. El ancho espectral de la fuente láser viene definido frecuentemente en las hojas de especificaciones del láser adquirido.

2.2.3. Interferencia entre dos ondas.

La interferencia se produce cuando dos o más ondas se superponen y el resultado es una onda de interferencia. Si las dos ondas que se superponen están en fase y la amplitud de la onda de interferencia resultante es mayor a las ondas originales que la conforman se habla de interferencia constructiva. Si, por el contrario, hay un desfase entre las dos ondas que se superponen y la amplitud de la onda de interferencia resultante es menor, entonces se tiene una interferencia destructiva.

Para que ocurra interferencia entre dos ondas debe existir un traslape físico entre ambas ondas tal como se indica en la Figura 2.9, y para obtener la interferencia deben tener el mismo tipo de coherencia sea espacial, temporal o ambas.

Si la onda 1 y 2 tienen coherencia temporal se tiene que:

$$E_1 = |E_1|e^{i\phi_1} = |E_1|e^{i\omega t_1} \quad (2.9)$$

$$E_2 = |E_2|e^{i\phi_2} = |E_2|e^{i\omega t_2} \quad (2.10)$$

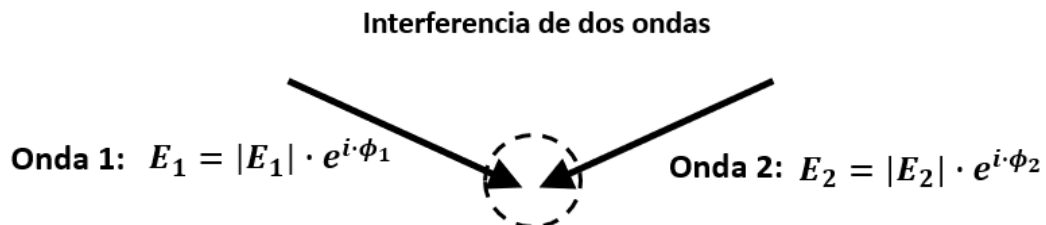


Figura 2.9. Interferencia de dos ondas.

El resultado de la superposición de estas dos ondas se muestra a continuación:

$$I = (E_1 + E_2)^2 = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* \quad (2.11)$$

$$I = |E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_1||E_2|e^{(\phi_1 - \phi_2)} + |E_1||E_2|e^{-(\phi_1 - \phi_2)} \quad (2.12)$$

$$I = |E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_1||E_2|\cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.13)$$

Donde I es la intensidad de la interferencia de la superposición de las dos ondas coherentes.

si ambas ondas tienen coherencia temporal, pero proviene de tiempos diferentes:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \omega t_1 - \omega t_2 = \omega(t_1 - t_2) \quad (2.14)$$

Entonces, el valor de la interferencia óptica descrita en la Ecuación 2.13 dependerá de la variación de fase constante $\Delta\phi$ entre las ondas 1 y 2 que se han superpuesto entre sí. La Ecuación 2.14 es muy importante, porque nos indica que para que haya una interferencia, las fases ϕ_1 y ϕ_2 de las ondas que interfieren deben ser conocidas y bien comportadas en el tiempo, lo cual ocurre cuando utilizamos fuentes láser con alta coherencia espacial.

2.3 Análisis de los campos reflejados en OTDR convencional y ϕ -OTDR.

Los puntos de esparcimiento dentro de la fibra óptica son dispersores microscópicos de la luz distribuidos al azar en toda la longitud de la fibra [15-17].

Para comprender el funcionamiento se consideran el escenario donde los puntos de esparcimiento se encuentren ordenados uniformemente dentro de la fibra. Ahora consideremos que en la posición z_1 y z_2 de la fibra óptica el pulso es reflejado como lo indica la Figura 2.10.

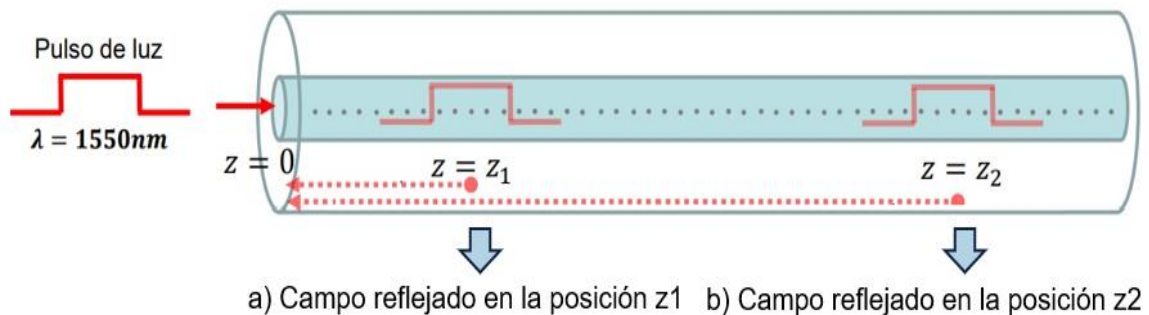


Figura 2.10. Campos reflejados por puntos de esparcimiento con distribución uniforme.

La expresión de los pulsos reflejados en la posición z_1 y z_2 se pueden expresar como:

$$E(z_1) = \sum_{m=1}^M r_m |E_0| \cdot e^{i\phi_m} \quad (2.15)$$

$$E(z_2) = \sum_{m=1}^M r'_m |E_0| \cdot e^{i\phi'_m} \quad (2.16)$$

Estas expresiones incluyen una sumatoria debido a que dentro del pulso óptico pueden haber varios puntos de esparcimiento, tal como se observa en la Figura 2.11. Cada punto de esparcimiento provoca que una pequeña porción del pulso de luz se refleje. La contribución de las pequeñas reflexiones causadas por cada punto de esparcimiento debe sumarse para generar un pulso total de luz reflejado tanto en z_1 como en z_2 .

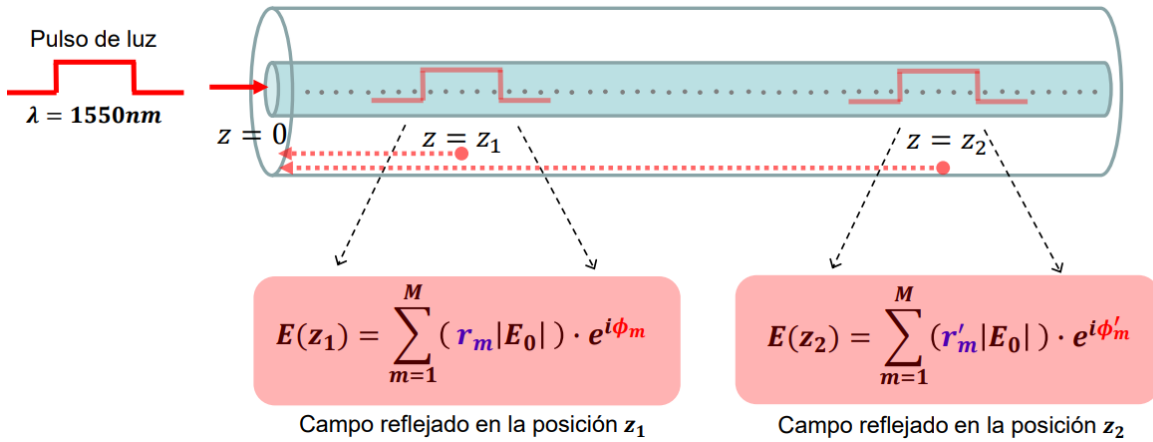


Figura 2.11. Campos reflejados por puntos de esparcimiento con distribución uniforme.

Podemos tener como ejemplo que en la posición z_1 se tiene un pulso de ancho $\tau = 1\text{ns}$ con un ancho espacial de $\Delta d = 0.1\text{m} = 10\text{cm}$. Dentro de dicho pulso hay M puntos de esparcimiento. Estos puntos de esparcimiento deben estar separados como máximo 1550nm que es la longitud de onda de la luz transmitida. para determinar la cantidad de puntos de esparcimiento M dentro del pulso de luz en z_1 se puede proceder de la siguiente forma:

$$M = \frac{\Delta d}{\lambda} \quad (2.17)$$

$$M = \frac{10\text{cm}}{1550 \times 10^{-9}} = 100000 \text{ puntos} \quad (2.18)$$

En total, todos estos puntos de esparcimiento provocarán un reflejo del pulso de luz. Por eso en la Ecuación 2.15 el campo reflejado está formado por una sumatoria con M

elementos. Todos estos reflejos se superpondrán y formarán una interferencia entre ellos mismos y también con el pulso transmitido. Para comprender dicha interferencia, se comienza considerando primero dos puntos de esparcimiento dentro del pulso y que estos dos interfieran entre sí, el campo reflejado resultante es la suma de estos dos campos reflejados:

$$E(z_1) = r_1|E_0|.e^{i\phi_1} + r_2|E_0|.e^{i\phi_2} \quad (2.19)$$

$$E(z_1) = r'_1|E_0|.e^{i\phi'_1} + r'_2|E_0|.e^{i\phi'_2} \quad (2.20)$$

En un sistema ϕ -OTDR se utiliza un láser con alta coherencia por tanto la fase no varía en el tiempo, o es bien conocida en el tiempo.

$$E = |E|.e^{i\phi} \quad (2.21)$$

La potencia de la interferencia producida en z_1 por la superposición de las dos ondas reflejadas por dos puntos de esparcimiento de la fibra esta dado por:

$$P(z_1) = |E(z_1)|^2 = |r_1|E_0|.e^{i\phi_1} + r_2|E_0|.e^{i\phi_2}|^2 \quad (2.22)$$

$$P(z_1) = [r_1|E_0|]^2 + [r_2|E_0|]^2 + [r_1r_2|E_0|^2 \cos(\phi_2 - \phi_1)] \quad (2.23)$$

La potencia de la interferencia producida en z_2 por la superposición de dos ondas reflejadas por dos puntos de esparcimiento esta dado por:

$$P(z_2) = |E(z_2)|^2 = |r'_1|E_0|.e^{i\phi'_1} + r'_2|E_0|.e^{i\phi'_2}|^2 \quad (2.24)$$

$$P(z_2) = [r'_1|E_0|]^2 + [r'_2|E_0|]^2 + [r'_1r'_2|E_0|^2 \cos(\phi'_2 - \phi'_1)] \quad (2.25)$$

Las Ecuaciones 2.23 y 2.25 son muy interesantes debido a que muestran como sería la potencia óptica reflejada en los puntos z_1 y z_2 de la fibra óptica considerando por simplicidad que el pulso ubicado en z_1 contiene en su interior dos puntos de esparcimiento que al superponerse forman el patrón de interferencia de la Ecuación 2.23, y que el pulso ubicado en z_2 contiene en su interior dos puntos de esparcimiento que al superponerse forman el patrón de interferencia de la Ecuación 2.25 respectivamente.

En la vida real, los fotodetectores registran un promedio de la potencia que les llega en un periodo de tiempo. Entonces lo que realmente medimos se puede ejemplificar con las siguientes ecuaciones,

Para el punto z_1 :

$$\langle P(z_1) \rangle = \langle |E(z_1)|^2 \rangle = \langle |r_1|E_0| \cdot e^{i\phi_1} + r_1|E_0| \cdot e^{i\phi_2} |^2 \rangle \quad (2.26)$$

$$\langle P(z_1) \rangle = \langle |r_1|E_0|^2 \rangle + \langle |r_2|E_0|^2 \rangle + \langle r_1 r_2 |E_0|^2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \rangle \quad (2.27)$$

Para el punto z_2 :

$$\langle P(z_2) \rangle = \langle |E(z_2)|^2 \rangle = \langle |r'_1|E_0| \cdot e^{i\phi'_1} + r'_2|E_0| \cdot e^{i\phi'_2} |^2 \rangle \quad (2.28)$$

$$\langle P(z_2) \rangle = \langle |r'_1|E_0|^2 \rangle + \langle |r'_2|E_0|^2 \rangle + \langle r'_1 r'_2 |E_0|^2 \cos(\phi'_2 - \phi'_1) \rangle \quad (2.29)$$

Donde el símbolo $\langle \ \rangle$ indica un promedio en el tiempo. **Entonces las Ecuaciones 2.27 y 2.39 nos indican los valores de potencia promedio que se reflejan en los puntos z_1 y z_2 de un OTDR sensible a la fase o ϕ -OTDR.**

Por otro lado, en un ODTR convencional, debido a que se utiliza un láser de baja coherencia, la fase es aleatoria en el tiempo, y por lo tanto, el promedio temporal de los siguientes términos es 0:

$$\langle r_1 r_2 |E_0|^2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \rangle_t = 0 \quad (2.30)$$

$$\langle r'_1 r'_2 |E_0|^2 \cos(\phi'_2 - \phi'_1) \rangle_t = 0 \quad (2.31)$$

Entonces, la potencia reflejada en los puntos z_1 y z_2 para un OTDR convencional son:

$$P(z_1) = \langle |E(z_1)|^2 \rangle_t = |r_1|E_0|^2 + |r_2|E_0|^2 \quad (2.32)$$

$$P(z_2) = \langle |E(z_2)|^2 \rangle_t = |r'_1|E_0|^2 + |r'_2|E_0|^2 \quad (2.33)$$

Entonces en un OTDR convencional no se presentan los términos cosenoidales en las expresiones de las potencias reflejadas, y que surgen de la interferencia óptica. En otras palabras, la traza de un OTDR convencional no presenta interferencias ópticas.

En el caso del sistema ϕ -OTDR, en las expresiones de las potencias reflejadas en los puntos z_1 y z_2 dadas en las Ecuaciones 2.27 y 2.29 se mantiene el término cosenoidal

$\cos(\phi_2 - \phi_1)$ y $\cos(\phi'_2 - \phi'_1)$ los cuales dan valores positivos y negativos según el valor de las fases de los campos reflejados. Esto genera “cambios abruptos” pero no aleatorios en la potencia reflejada de la traza del ϕ -OTDR [18]. Dichos cambios abruptos corresponden a la interferencia óptica que se presenta en los campos reflejados en cada punto de la fibra óptica.

En la siguiente sección se muestran mediante gráficas como se diferencian las trazas de potencias reflejadas entre un ϕ -OTDR y un OTDR convencional.

2.3.1 Comparación de trazas típicas de un OTDR convencional y un ϕ -OTDR.

Una traza correspondiente a un OTDR convencional se distingue porque decae de forma uniformemente la potencia reflejada o retro-esparcida. La pendiente de la curva representa el coeficiente de atenuación de la fibra tal como se observa en la Figura 2.12. En fibras convencionales o estándar como la fibra SMF28, típicamente la atenuación tiene el valor de $\alpha = 0.2\text{dB}/\text{km}$ e indica la pérdida de potencia en la longitud de fibra recorrida.

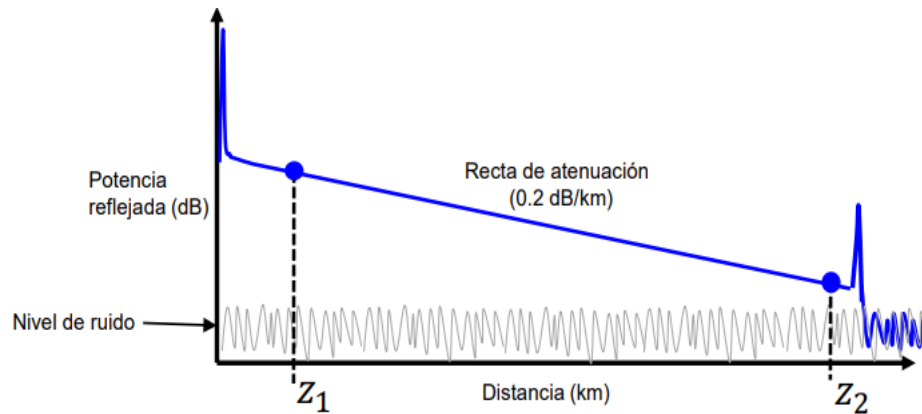


Figura 2.12. Traza de un OTDR convencional.

En un sistema ϕ -OTDR, la variación de $\cos(\phi_2 - \phi_1)$ que viene en las expresiones de la potencia reflejada depende de los valores que tomen las fases ϕ_1 y ϕ_2 , provocando cambios que se suman positivamente y negativamente al promedio de la potencia reflejada tal como se aprecia en la curva de color rojo de la Figura 2.13, la cual se sobrepone a la curva de color azul de un OTDR convencional. La traza resultante de un ϕ -OTDR también se atenúa conforme recorre la longitud de fibra en forma similar a la traza del OTDR

convencional pero ahora presentando también las variaciones en la potencia reflejada debido a el coeficiente cosenoidal descrito por las variaciones de fase.

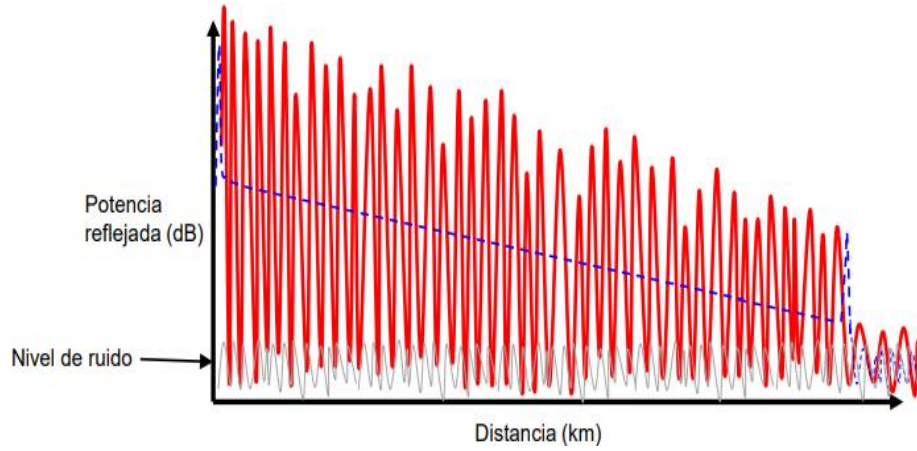


Figura 2.13. Trazas de un ϕ -OTDR.

2.3.2 Coeficiente de atenuación en trazas ϕ -OTDR.

Se pueden extender las ecuaciones de potencia reflejada de un ϕ -OTDR considerando el coeficiente de atenuación en las Ecuaciones 2.19 y 2.20 respectivamente. Para ello recordemos que la fibra estándar SMF28 (también denominada fibra G.652) tiene una atenuación de $\alpha = 0.2\text{dB}/\text{km}$. Al considerar la atenuación de la fibra, las ecuaciones mencionadas se modifican de la siguiente manera:

$$E(z_1) = (r_1|E_0|.e^{i\phi_1} + r_2|E_0|.e^{i\phi_2})e^{-\alpha \cdot z_1/2} \quad (2.34)$$

$$E(z_2) = (r'_1|E_0|.e^{i\phi'_1} + r'_2|E_0|.e^{i\phi'_2})e^{-\alpha \cdot z_2/2} \quad (2.35)$$

La potencia reflejada en los puntos z_1 y z_2 queda entonces como:

$$P(z_1) = \langle [r_1|E_0|^2] \rangle + \langle [r_2|E_0|^2] \rangle + \langle [r_1r_2|E_0|^2 \cos(\phi_2 - \phi_1)] \rangle_t e^{-\alpha \cdot z_1/2} \quad (2.36)$$

$$P(z_2) = \langle [r'_1|E_0|^2] \rangle + \langle [r'_2|E_0|^2] \rangle + \langle [r'_1r'_2|E_0|^2 \cos(\phi'_2 - \phi'_1)] \rangle_t e^{-\alpha \cdot z_2/2} \quad (2.37)$$

Estas expresiones se pueden visualizar de una mejor manera en la Figura 2.14 respectivamente.

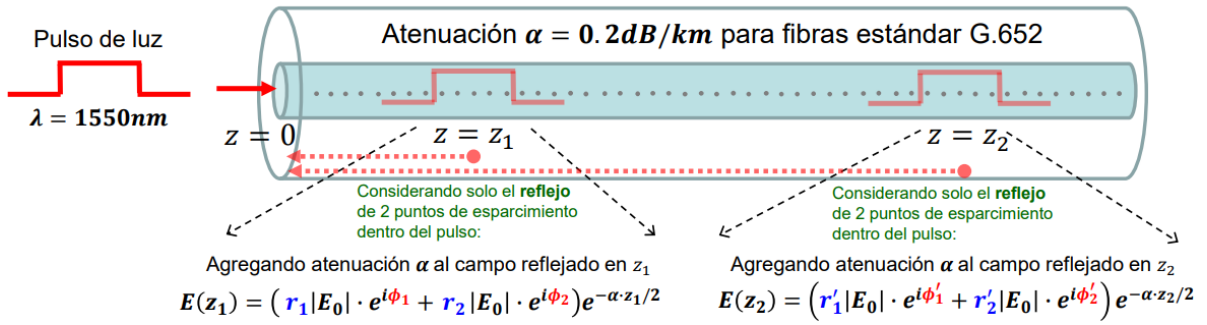


Figura 2.14. Campos reflejados por puntos de esparcimiento con distribución uniforme y coeficiente de atenuación α .

Ahora, si se consideran M puntos de esparcimiento en lugar de solo dos puntos dentro del pulso, las expresiones de las potencias reflejadas en un sistema ϕ -OTDR queda de la siguiente manera:

$$E(z_1) = e^{-\alpha \cdot z_1/2} \sum_{m=1}^M (r_m |E_0|) \cdot e^{i\phi_m} \quad (2.38)$$

$$E(z_2) = e^{-\alpha \cdot z_2/2} \sum_{m=1}^M (r'_m |E_0|) \cdot e^{i\phi'_m} \quad (2.39)$$

Las cuales se pueden visualizar de una mejor forma en la Figura 2.15.

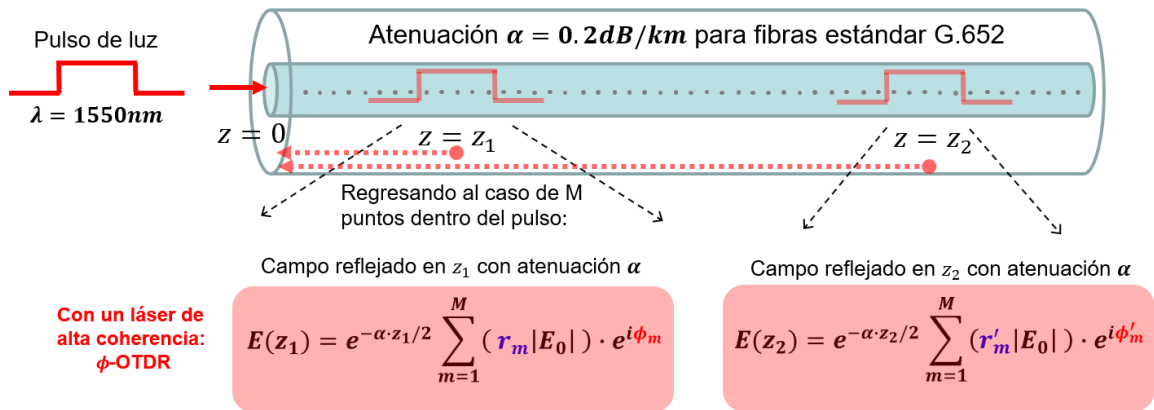


Figura 2.15. Campos reflejados por puntos de esparcimiento con distribución uniforme para un sistema ϕ -OTDR considerando la atenuación de la fibra óptica.

Para poder evaluar el comportamiento de un sistema ϕ -OTDR resulta indispensable considerar la forma de los campos reflejados en cada punto de la fibra óptica, lo cual es descrito en la Figura 2.15, y sus respectivos valores de potencia que se pueden obtener con las expresiones de los campos reflejados.

Mediante el modelo matemático de los campos reflejados descrito en el presente capítulo se puede analizar las características que debe poseer una traza ϕ -OTDR y la necesidad de que la luz interfiera coherentemente para poder lograr una traza con interferencias, lo cual es importante para diferenciar el comportamiento de las trazas resultantes sin perturbación y con perturbación añadida en la fibra óptica.

CAPÍTULO 3

Simulación del sistema ϕ -OTDR con y sin perturbación en fibras ópticas convencionales.

Para simular la traza ϕ -ODTR con y sin perturbación, los análisis teóricos expuestos en el capítulo anterior resultan de vital importancia, ya que permiten estudiar numéricamente las características del funcionamiento de los sensores ϕ -OTDR a través de algoritmos programados en Matlab®. En particular se simula la respuesta de un ϕ -OTDR cuando ocurre una perturbación en algún punto de la fibra óptica convencional, como cambios en la temperatura externa y variaciones de tensión, los cuales introducen cambios en el índice de refracción $\Delta n(z)$ de la fibra óptica y producen en consecuencia cambios en la fase de los pulsos reflejados y en las interferencias presentes en la traza del sistema ϕ -OTDR.

3.1 Generación de Traza ϕ -OTDR.

Una fibra óptica constituye un medio dieléctrico que puede ser modelado como un tubo de vidrio unidimensional con impurezas o centros de esparcimiento en su interior que reflejan la luz conforme se transmite por la fibra. Cuando la luz incide en cada punto de esparcimiento, el índice de refracción en este punto está determinado por el índice de refracción promedio de la fibra más las fluctuaciones o variaciones causadas por impurezas o aglomeraciones moleculares:

$$n(z) = n_{ave} + \Delta n(z) \quad (3.1)$$

Donde n_{ave} es el índice de refracción promedio a lo largo de la fibra y $\Delta n(z)$ es la variación local en el punto de esparcimiento el cual puede ser aleatorio. Lo anterior provoca que el índice de refracción en cada punto de la fibra óptica presente ligeras variaciones aleatorias $n_{random} = n_{ave} + \Delta n(z)$. La falta de homogeneidad de la fibra influye en la propagación de la luz tanto en la dirección de transmisión como en la dirección de reflexión (o retro-esparcimiento) causado por las imperfecciones[18].

Las ondas reflejadas por los puntos de esparcimiento interfieren entre sí de forma coherente, y el campo eléctrico reflejado resultante representa la suma de todos los campos eléctricos que han sido reflejados o retro-esparcidos por diferentes puntos de esparcimiento que se encuentran dentro de dicho intervalo de fibra. Este intervalo o sección de fibra

corresponde al ancho del pulso óptico: La siguiente ecuación describe matemáticamente la sumatoria del campo eléctrico total reflejado en una sección de fibra correspondiente al ancho del pulso causado por M puntos de esparcimiento que se encuentran dentro del pulso óptico:

$$E(z) = e^{-\alpha z/2} \sum_{m=1}^M (r_m(z) \cdot |E_0|) \cdot e^{i\phi_m(z)} \quad (3.2)$$

La expresión anterior también describe en cierta manera la interferencia óptica que se produce al superponer diferentes campos eléctricos coherentes reflejados por M puntos de esparcimiento que se encuentran dentro del pulso óptico. La interferencia que se genera en cada posición de la fibra óptica es diferente y sigue un comportamiento aleatorio debido a que el valor de $\Delta n(z)$ en la Ecuación 3.1 no es constante a lo largo de la fibra óptica. En particular, la fase de la luz reflejada por cada punto de esparcimiento puede tomar diferentes valores aleatorios de fase de acuerdo con la Ecuación 3.3.

$$\phi_m(z) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{random} \cdot z \quad (3.3)$$

En la Figura 3.1 se observa como ocurre la transmisión de los pulsos ópticos en la fibra óptica. La resolución de la traza Δz , que está definida sobre la escala horizontal de color rojo en la Figura 3.1, define los pasos en como el pulso óptico se va a estar moviendo a lo largo de la fibra óptica. Asimismo, dentro de cada pulso óptico hay M puntos de esparcimiento que tienen una separación $\Delta p < \Delta z$. Como ejemplo, en la Figura 3.1, para cada posición del pulso óptico dentro de la fibra óptica, siempre habrá dentro del pulso al menos 8 puntos de esparcimiento cuyos reflejos interferirán coherentemente de acuerdo a la Ecuación 3.2. En realidad, para las simulaciones se deben considerar al menos 10 puntos de esparcimiento dentro del pulso para obtener trazas ϕ -ODTR realistas.

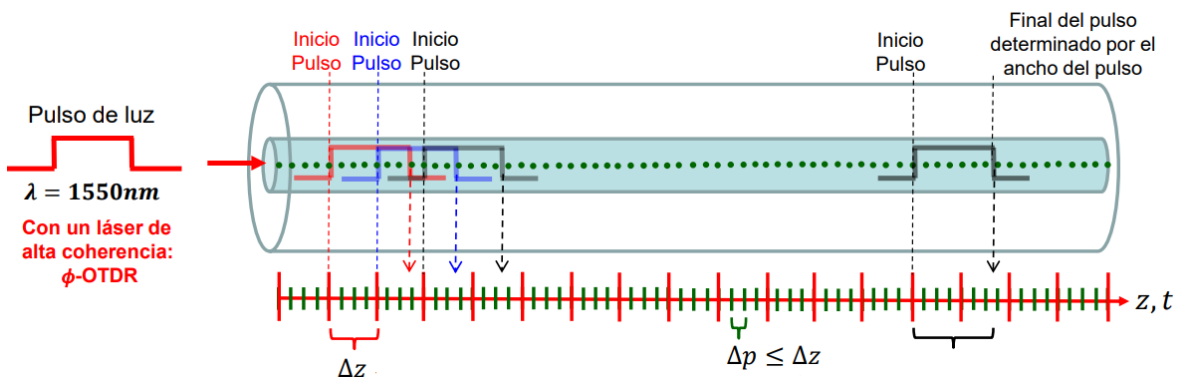


Figura 3.1 Representación del esquema ϕ -ODTR a simular.

Para calcular el pulso de luz reflejado, los puntos de esparcimiento deben estar espaciados una distancia Δp que debe ser menor o igual a la resolución de la traza Δz . En cada punto de esparcimiento se establece un coeficiente de reflexión y también un índice de refracción que define la fase del campo reflejado por cada punto de esparcimiento.

Para proseguir con la obtención de la traza simulada, se determina la cantidad de puntos de esparcimiento contenidos dentro del pulso óptico desde el inicio al final acotados por el ancho del pulso. Se ubica la posición de fibra en el centro del pulso y se transmite el pulso siguiente para determinar los campos y la potencia reflejada del pulso en cada posición de la fibra.

3.2 Coeficiente de reflexión en sistema ϕ -ODTR.

Cada punto de esparcimiento dentro del pulso puede tomar valores aleatorios del coeficiente de reflexión en el rango $0 < r_m(z) \leq 0.04$ y valores aleatorios de fase como se describe en la ecuación 3.3.

Para la simulación se definió el coeficiente de reflexión aleatorio de la siguiente forma [18]:

$$r_m = 4 \times 10^{-2} \text{randn} \quad (3.4)$$

En la Ecuación 3.4 se considera que el valor máximo que puede tomar el coeficiente de reflexión es 4×10^{-2} que corresponde al 4% de reflexión de Fresnel, y su valor variará alrededor de 4×10^{-2} en forma estocástica en cada punto de esparcimiento siguiendo una distribución de probabilidad normal (gaussiana).

El índice de refracción en cada punto de esparcimiento también es aleatorio y está dado por el índice de refracción promedio el cual variará estocásticamente alejándose hacia arriba o hacia abajo del valor promedio n_{ave} hasta un valor máximo de 2×10^{-6} siguiendo una distribución de probabilidad gaussiana, tal como se indica en la Ecuación 3.5 [18]:

$$n_{random} = n_{ave} + 2 \times 10^{-6} \text{randn} \quad (3.5)$$

A medida que avanza el pulso por la fibra óptica generamos un eje horizontal z' cuyos valores estarán basados en la ubicación del centro del pulso óptico conforme éste avanza a lo largo de la fibra óptica. En cada posición del pulso (correspondiente a cada punto del eje z') se calcula el campo total reflejado por los puntos de esparcimiento que se encuentran dentro de dicho pulso, y dicho valor es asignado a cada posición del eje horizontal z' tal como se describe en la Figura 3.2 respectivamente.

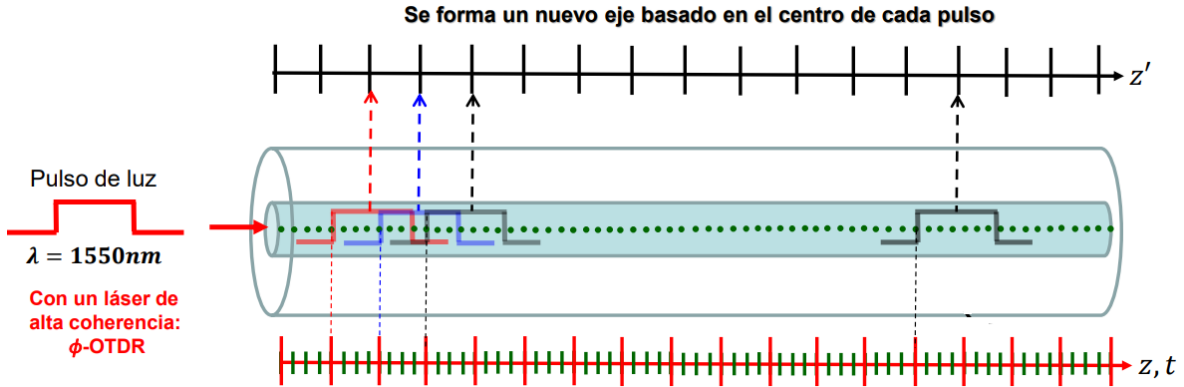


Figura 3.2. Generación del eje horizontal para la simulación de Trazas ϕ -ODTR.

Entonces, para términos de la simulación numérica, la Ecuación 3.2 ahora se expresa de acuerdo la Ecuación 3.5.

$$E(z') = e^{-\alpha z/2} \sum_{m=1}^M (r_m(z) \cdot |E_0|) \cdot e^{i\phi_m(z)} \quad (3.6)$$

En cada punto del eje z' habrá un valor de interferencia óptica causado por la superposición del reflejo de M puntos de esparcimiento obtenido con la Ecuación 3.5.

3.3 Propiedades estadísticas y validación de las trazas ϕ -ODTR sin perturbación.

Para modelar y validar que las trazas ϕ -ODTR simuladas sean realistas se deben analizar las propiedades estadísticas de la luz retro-esparcida. El esparcimiento Rayleigh es un proceso aleatorio donde la amplitud del campo reflejado $E(z')$ en cada punto del eje z' dada por la Ecuación 3.6, toma valores estocásticos que deben seguir una distribución de probabilidad de Rayleigh [18]. Por lo tanto, una primera validación de una traza ϕ -ODTR es tomar los valores de la amplitud del campo eléctrico reflejado en cada punto del eje z' y

obtener su histograma de amplitud, el cual debe seguir una distribución de probabilidad de Rayleigh respectivamente.

Por otro lado, los valores de la fase obtenidas por la Ecuación 3.3 deben seguir una distribución de probabilidad uniforme y los valores de potencia $|E(z')|^2$ para cada punto del eje z' debe seguir una distribución de probabilidad exponencial. Estas propiedades estadísticas de una traza ϕ -ODTR han sido confirmadas experimentalmente en otros trabajos de investigación [18].

Es importante mencionar que en el esquema numérico descrito en las figuras anteriores solo se han considerado puntos de espacimientto distribuidos uniformemente a lo largo de la fibra óptica. Pero en las simulaciones que se presentarán más adelante se han considerado puntos de espacimientto distribuidos uniformemente, así como también puntos de espacimientto distribuidos aleatoriamente a lo largo de la fibra óptica. Todas las trazas simuladas sin perturbación que se mostrarán a continuación fueron obtenidas usando el código descrito en el Apéndice 1.

3.3.1 Trazas ϕ -ODTR sin perturbación obtenidas con puntos de espacimientto ordenados uniformemente.

Para simular las trazas cuando los puntos de espacimientto se encuentran ordenados uniformemente se define la densidad de puntos de espacimientto por metro, esto permite conocer la cantidad total de puntos de espacimienttos que estarán en el interior del pulso.

El coeficiente de reflexión y la fase del campo reflejado por cada punto de espacimientto se definen a partir de las Ecuaciones 3.4 y 3.5.

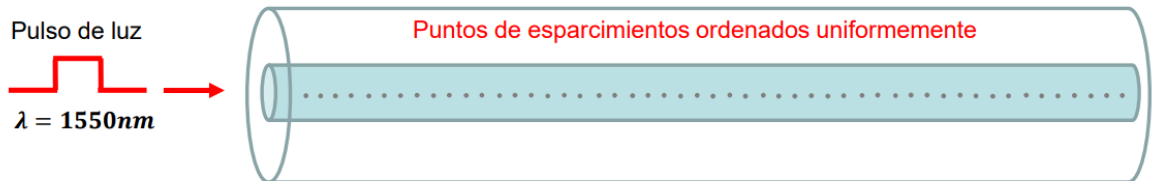


Figura 3.3. Puntos de espacimienttos ordenados uniformemente.

La separación entre imperfecciones no debe superar la longitud de onda del pulso para considerar el caso más realista posible.

En las Figuras 3.3 y 3.4 se observa la distribución uniforme de los puntos de espaciamiento. Para la simulación, se secciona la fibra en intervalos ΔL . El intervalo ΔL se puede ver como la longitud que tiene el ancho del pulso óptico. En cada sección ΔL de la fibra, hay M centros de espaciamiento que están distribuidos en forma uniforme.

Para la simulación se consideran un mínimo de 10 puntos de espaciamiento por $\Delta L = 1m$ para una longitud de fibra óptica de $L = 3Km$.

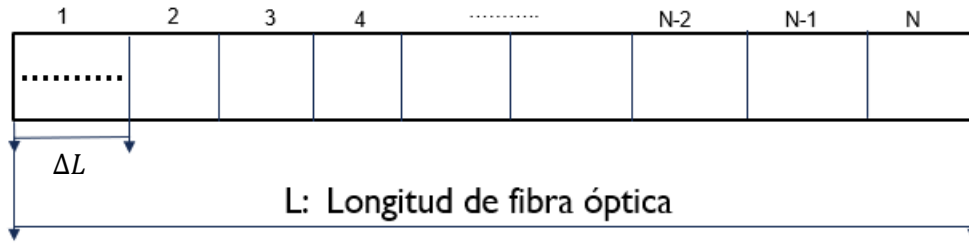


Figura 3.4. Distribución uniforme de puntos de espaciamiento en la fibra óptica.

Al aplicar la Ecuación 3.6 y considerando 10 puntos de espaciamiento dentro de cada pulso óptico se puede obtener la traza ϕ -ODTR de la Figura 3.5 a) que corresponde a la amplitud $|E(z')|$ normalizada. En la Figura 3.5 b) se observa el histograma de amplitud de esta traza sobre la cual se puede ajustar una distribución de probabilidad de Rayleigh (curva roja), indicando con ello que es una traza representativa de un caso real.

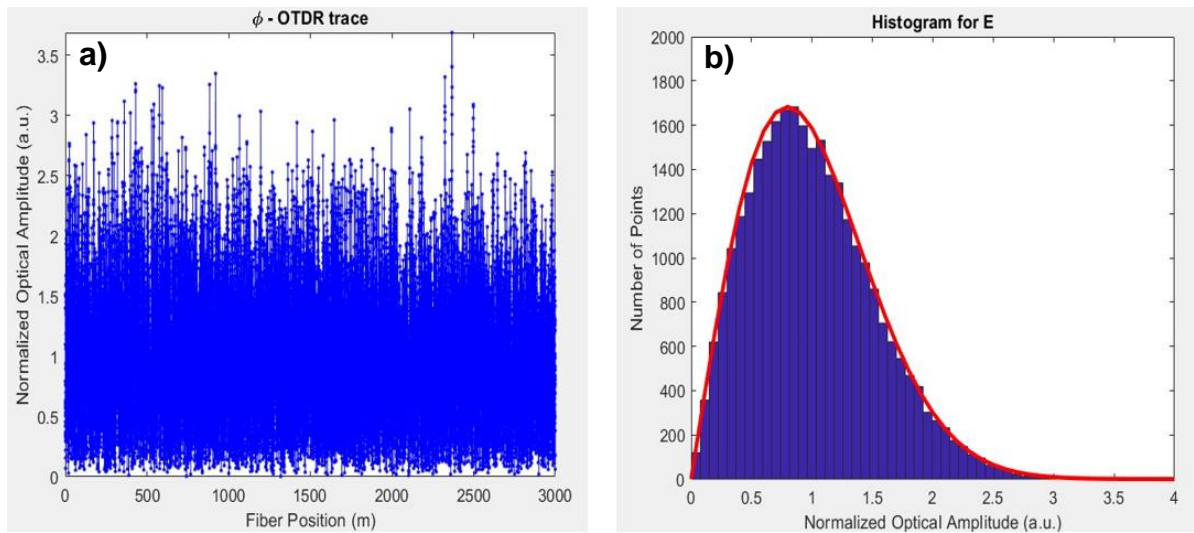


Figura 3.5. Validación de trazas ϕ -ODTR. a) Traza ϕ -ODTR en amplitud obtenida con puntos de espaciamiento ordenados uniformemente, b) Histograma de Amplitud.

De la misma forma, la fase óptica de la traza se distribuye uniformemente, tal como se muestra en la Figura 3.6 a), y su histograma descrito en la Figura 3.6 b) sigue una distribución de probabilidad uniforme, tal como se sugiere en literatura [18].

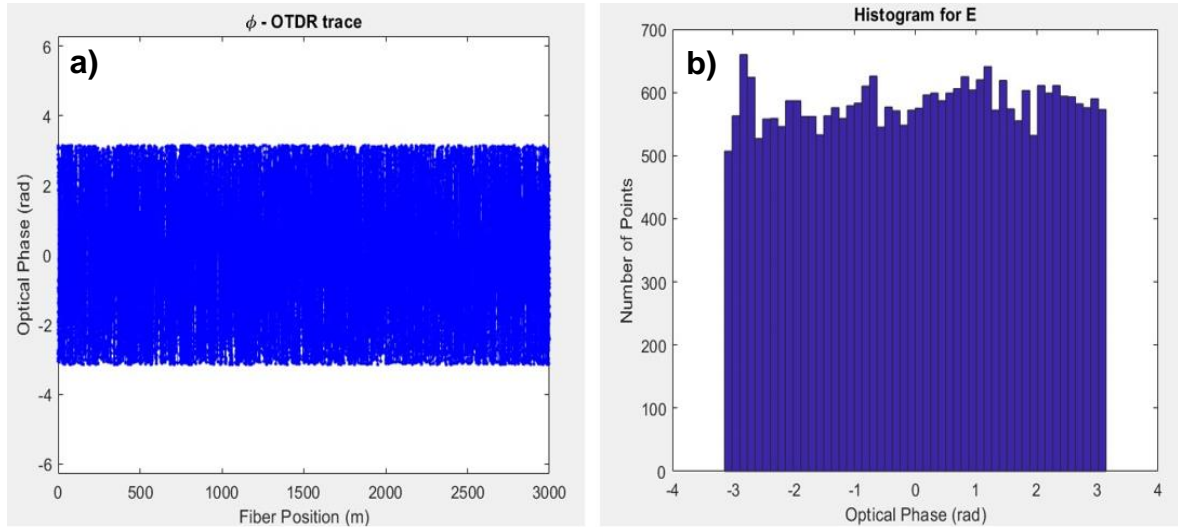


Figura 3.6. Validación de trazas ϕ -ODTR. a) Fase de la traza ϕ -ODTR con puntos de espaciamiento ordenados uniformemente b) Histograma de fase.

En la Figura 3.7 a) se observa la traza ϕ -ODTR correspondiente a los valores de potencia $|E(z')|^2$ normalizada, y en la Figura 3.7 b) se observa su histograma sobre la cual se puede ajustar una distribución de probabilidad exponencial (curva roja).

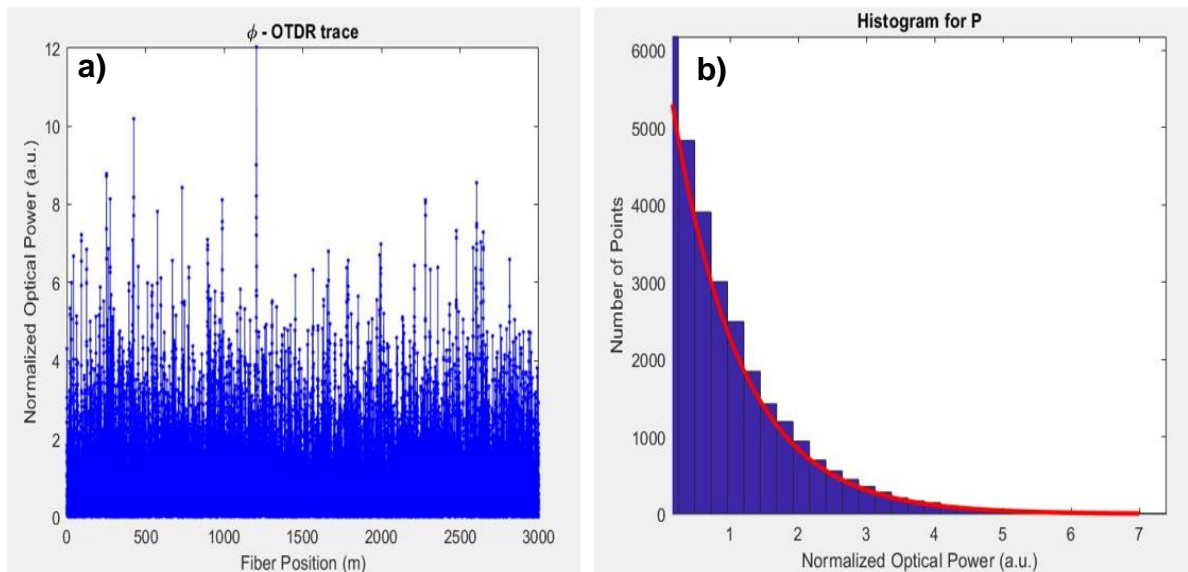


Figura 3.7. Validación de trazas ϕ -ODTR. a) Traza ϕ -ODTR en potencia obtenida con puntos de espaciamiento ordenados uniformemente, b) Histograma de potencia.

En resumen, las trazas simuladas que fueron generadas a partir de puntos de esparcimiento distribuidos uniformemente a lo largo de la fibra óptica, conservan las características estadísticas del retro-esparcimiento de Rayleigh [18].

3.3.2 Trazas ϕ -OTDR sin perturbación obtenidas con puntos de esparcimiento ordenados aleatoriamente.

Para obtener la simulación de las trazas ϕ -OTDR cuando los puntos de esparcimiento se encuentran distribuidos aleatoriamente no se secciona la fibra en tramos pequeños como el caso anterior sino se considera una cantidad total de puntos de esparcimiento en toda la extensión de la fibra óptica y se distribuyen aleatoriamente en toda su longitud (Figura 3.8).

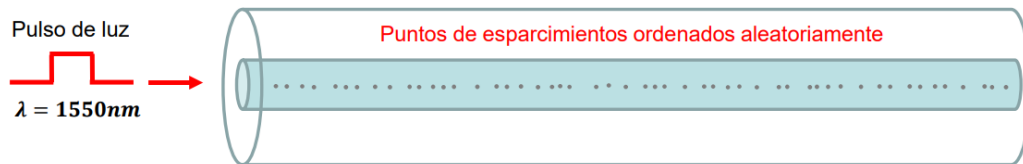


Figura 3.8. Puntos de esparcimientos ordenados aleatoriamente.

En la Figura 3.9 a) se observa la traza ϕ -OTDR correspondiente a los valores de amplitud $|E(z')|$ normalizada, y en la Figura 3.9 b) se observa su histograma sobre la cual se puede ajustar una distribución de probabilidad de Rayleigh (curva roja), indicando con ello que es una traza realista.

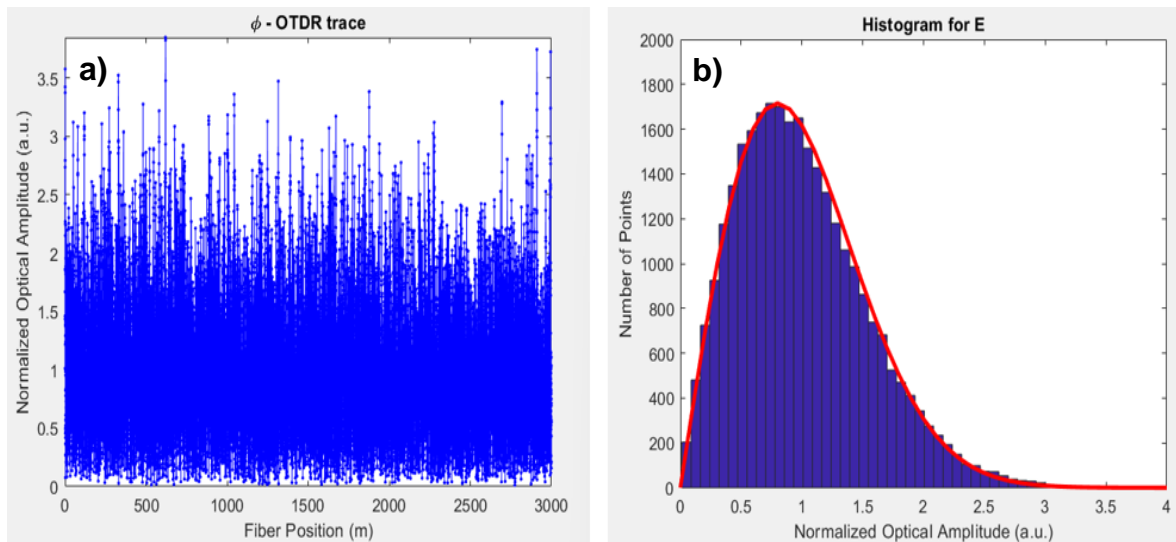


Figura 3.9. Validación de trazas ϕ -OTDR. a) Traza ϕ -OTDR en amplitud obtenida con puntos de esparcimiento ordenados aleatoriamente, b) Histograma de Amplitud.

La fase óptica a lo largo de la traza se debe distribuir uniformemente, tal como se muestra en la Figura 3.10 a). Su histograma descrito en la Figura 3.10 b) efectivamente sigue una distribución de probabilidad uniforme, tal como se sugiere en literatura [18].

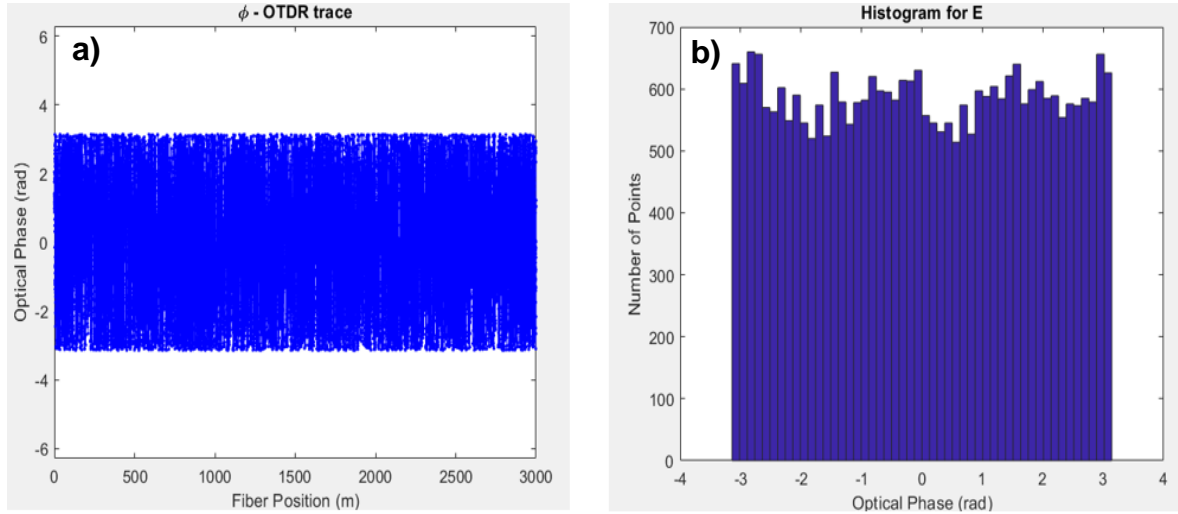


Figura 3.10. Validación de trazas ϕ -ODTR. a) Fase de la traza ϕ -ODTR con puntos de espacimient ordenados aleatoriamente b) Histograma de fase.

En la Figura 3.11 a) se observa la traza ϕ -ODTR correspondiente a los valores de potencia $|E(z')|^2$ normalizada, y en la Figura 3.11 b) se observa su histograma sobre la cual se puede ajustar una distribución de probabilidad exponencial (curva roja).

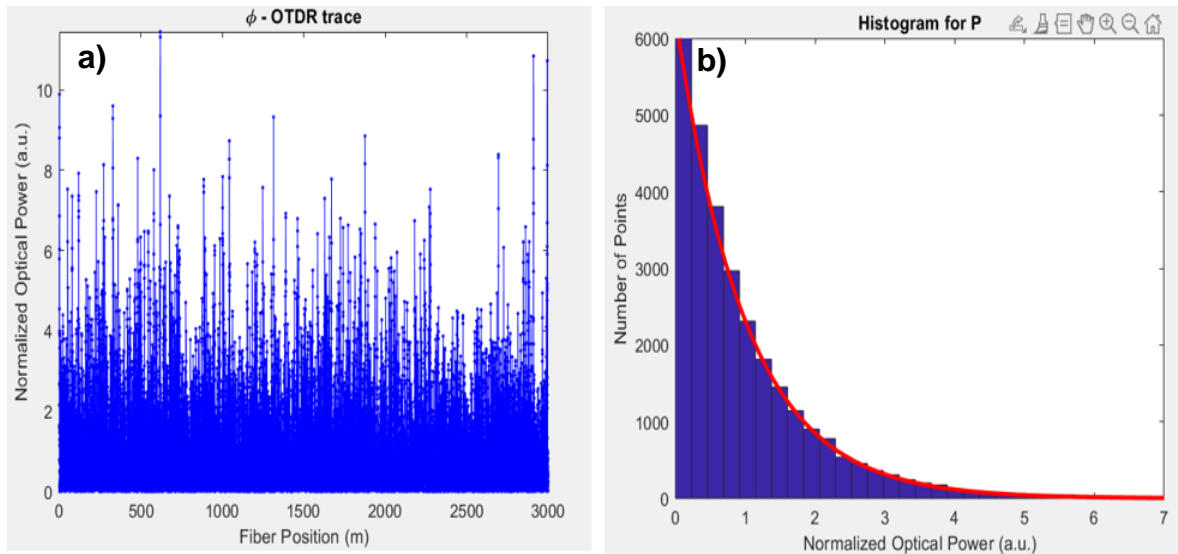


Figura 3.11. Validación de trazas ϕ -ODTR. a) Traza ϕ -ODTR en potencia obtenida con puntos de espacimient ordenados aleatoriamente, b) Histograma de potencia.

En resumen, las trazas simuladas que fueron generadas a partir de puntos de esparcimiento distribuidos aleatoriamente a lo largo de la fibra óptica, también conservan las características estadísticas del retro-esparcimiento de Rayleigh [18].

3.4. Efectos ópticos en fibra ópticas útiles para el desarrollo de sensores.

La sensibilidad de la fibra óptica a variaciones o cambios de temperatura y tensión favorece el desarrollo de sensores ópticos. Con los cambios de temperatura se observa una expansión térmica o efecto termo-óptico del vidrio con que es fabricada la fibra óptica y con las variaciones de tensión se introduce un efecto elasto-óptico (también llamado efecto foto-elástico) que modifica la densidad del vidrio de la fibra. Ambos efectos provocan cambios en el índice de refracción en el punto donde se ejerce la perturbación y por tanto provocan una variación en la amplitud y fase de los campos reflejados por los puntos de esparcimiento, además de modificar también el tamaño físico de la fibra [19].

Las propiedades ópticas de los materiales dependen de la temperatura a la que están sometidos. Una variación mínima en temperatura incorpora una modificación en el índice de refracción n_{eff} debido al efecto termo-óptico de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Delta n_{eff} = \gamma \cdot \Delta T \quad (3.7)$$

La variación del índice de refracción efectivo Δn_{eff} depende del parámetro γ que representa el coeficiente termo-óptico del material de la fibra óptica compuesto de Dióxido de Silicio (Sílice) posee un valor alrededor de $\gamma = 9.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$, mientras que ΔT indica la variación de la temperatura en grados Kelvin [15].

Otra de las consecuencias de variar la temperatura en la fibra es que ésta puede expandirse. La expansión térmica provoca otro cambio en el índice de refracción dado por:

$$\Delta n_{eff} = \eta \cdot n_{eff} \cdot \Delta T \quad (3.8)$$

Donde ΔT la variación de la temperatura y η es el coeficiente de expansión térmica. Para fibras ópticas convencionales de Sílice, $\eta = 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$.

La fase de la luz dada se determina mediante el índice de refracción de la fibra, la longitud de la fibra óptica que es perturbada y el número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ que depende de la longitud de onda del pulso de luz, que en este caso es 1550 nm :

$$\phi = n_{eff} k L \quad (3.9)$$

De las ecuaciones anteriores se deriva que, a partir de un cambio de temperatura, el cambio de fase causado por temperatura puede expresarse como:

$$\Delta\phi = (\eta n_{eff} + \gamma)kL\Delta T \quad (3.10)$$

Este cambio de fase causado por temperatura es muy importante, debido a que corresponde a la nueva fase que tendrán los campos reflejados por los puntos de esparcimiento dentro de la sección de la fibra donde se esté aplicando esta perturbación.

Por otro lado, El cambio en el índice de refracción debido a una deformación del material causado por un estiramiento o presión se debe al efecto elasto-óptico. La tensión aplicada a la fibra en un punto introduce una variación del índice de refracción y como resultado se produce un cambio de fase de la luz que se propaga dentro de la fibra. La sensibilidad de la fase óptica a la presión aplicada en una fibra óptica está definida como $\frac{\Delta\phi}{\phi\Delta P}$ en donde $\Delta\phi$ es el cambio en la fase asociado a un cambio en la presión ΔP . La expresión para calcular el cambio de fase por una fuerza de presión esta dado por [18, 20]:

$$\Delta\phi = 2\pi n_{eff} \nu \frac{l}{c} * (\xi \varepsilon + \varepsilon) \quad (3.11)$$

Donde ε es la deformación aplicada, l es la longitud de la fibra que es perturbada, $\nu = 1/\lambda$ es la frecuencia de la luz (que es el inverso de su longitud de onda), y el factor ξ es la relación de Poisson del material dada por la Ecuación 3.12:

$$\xi = -\frac{1}{2}n^2[(1 - \mu)p_{12} - \mu p_{11}] \quad (3.12)$$

Los coeficientes de deformación óptica dados en la relación de Poisson de la Ecuación 3.12 para el material Sílice con que es fabricada la fibra óptica son: $p_{11} = 0.121$ y $p_{12} = 0.127$ y $\mu = 0.17$.

Esto hace reducir la Ecuación 3.12 de la siguiente forma:

$$\Delta\phi = 2\pi n_{eff} \nu \frac{l}{c} * (1 - 0.1n_{eff}^2) \quad (3.13)$$

La Ecuación 3.13 describe la variación de fase por cambios de tensión y una deformación elástica en la fibra óptica.

3.4.1 Generación de traza ϕ -ODTR con perturbación.

Para generar la traza con perturbación se considera el impacto de las perturbaciones externas en la fibra óptica y en los campos reflejados por el retro-esparcimiento de Rayleigh.

La tensión y temperatura aplicada en la fibra induce cambios en el índice de refracción y modifica la fase de los campos reflejados por los puntos de esparcimiento.

Se asume un modelo matemático donde los puntos de esparcimiento están fijos y distribuidos uniformemente en toda la extensión de la fibra óptica. Las variaciones de temperatura provocan cambios en el tamaño de los puntos de esparcimiento debido al efecto termo-óptico y de expansión térmica e introduce un cambio en la fase óptica que sigue la Ecuación 3.10.

De la ecuación 3.7 a la 3.9 se obtiene la variación total del índice de refracción Δn_T por cambios de temperatura, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta n_T = (\gamma + n_{eff}\eta)\Delta T \quad (3.14)$$

Por otro lado, la variación del índice de refracción Δn_ε causadas por una deformación aplicada sobre la fibra puede definirse a partir de la Ecuación 3.13 de la siguiente manera:

$$\Delta n_{eff} = n_{eff}(1 - 0.1n_{eff}^2)\varepsilon \quad (3.15)$$

A las variaciones en el índice de refracción generadas aleatoriamente por retro-esparcimiento de Rayleigh se le añaden las fluctuaciones por temperatura Δn_T y deformación Δn_ε debido a la perturbación aplicada [21].

En la Figura 3.12 se observa en forma pictórica como se vería el promedio de 200 trazas ϕ -ODTR sin perturbación, y el promedio de 200 trazas ϕ -ODTR con una perturbación en algún punto de la fibra óptica.

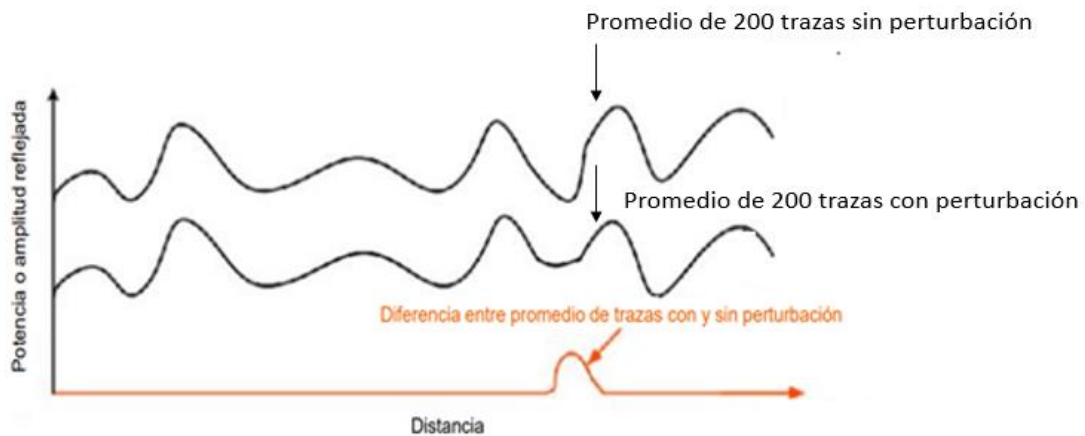


Figura 3.12. Representación del promedio de trazas ϕ -ODTR sin perturbación y con perturbación, así como también la diferencia de estos promedios de trazas para localizar y hacer visible la perturbación.

En la Figura 3.12 se observa que aparentemente ambas curvas que representan un promedio de trazas con y sin perturbación son casi idénticas, pero cuando se restan entre sí, en el punto de la fibra óptica donde se ejerce la perturbación la resta de ambas curvas presenta una diferencia no nula la cual representa el nivel de perturbación aplicado sobre la fibra óptica en dicho punto.

El procedimiento descrito en la Figura 3.12 es el que se empleará en las siguientes secciones para visualizar la perturbación aplicada en algún punto específico de la fibra óptica. El algoritmo desarrollado en Matlab para realizar tal propósito se describe en el Apéndice 2. En este caso, la atenuación de la fibra óptica se desprecia para explorar las propiedades intrínsecas de la luz reflejada por el retro-esparcimiento Rayleigh.

3.5 Simulación de trazas ϕ -ODTR con perturbación.

En general, las perturbaciones por temperatura y deformaciones se presentan en forma combinada y ambos introducen variaciones en el índice de refracción mediante los índices equivalentes Δn_T y Δn_ϵ dados por cambios de temperatura y tensión [18].

Para investigar a detalle solamente la influencia que tiene Δn_T en la variación índice de refracción se asume que no existe variación por deformación o tensión en la fibra, esto quiere decir que $\Delta n_\epsilon = 0$.

Las variaciones de temperatura se introducen a través de cambios de índice de refracción Δn_T descrito en la Ecuación 3.13. En la simulación se aplicó una perturbación correspondiente a un cambio de temperatura en una sección de 2m de una fibra óptica de 3km de longitud. En particular dicha sección de 2m va desde los 1000m hasta los 1002m y se consideró una temperatura ambiente de 300 °K (26.85°C) como temperatura inicial y se tomaron en cuenta los valores de los coeficientes de expansión térmica y termo óptico dados anteriormente: $\eta = 0.55 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\gamma = 9.2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

En epígrafes anteriores se consideró en las simulaciones una fibra óptica monomodo convencional de 3 km de longitud e índice de refracción promedio $n_{ave} = 1.456$. Nuevamente, a lo largo de la fibra óptica habrá variaciones de este índice de refracción $\Delta n'(z)$ en cada punto de la fibra debido a imperfecciones e impurezas denominados puntos de esparcimiento. Esta variación del índice de refracción en cada punto es aleatoria y tal como se había descrito anteriormente, se genera aleatoriamente usando una función de distribución de probabilidad gaussiana con una desviación estándar de 2×10^{-6} , la longitud

de onda de trabajo utilizada para el modelado fue de 1550 nm , junto con un ancho de pulso de 10 ns . Dicho ancho de pulso le corresponde una resolución espacial de 1 m de acuerdo a la Ecuación 2.5.

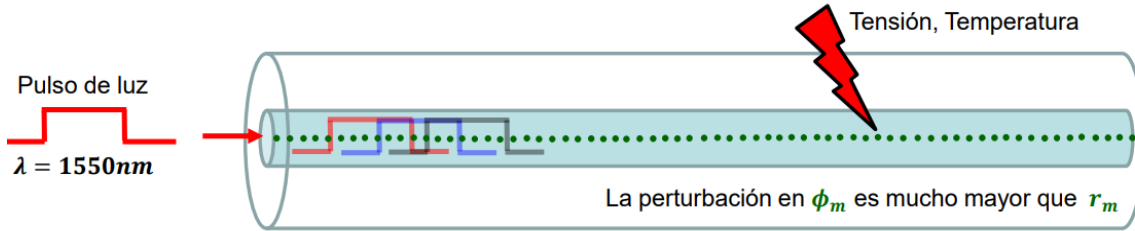


Figura 3.13. Perturbación aplicada en un punto de la fibra óptica.

En la Figura 3.13 se aprecia como una perturbación es aplicada en un punto o sección de la fibra óptica. La perturbación modifica el coeficiente de reflexión r_m y la fase ϕ_m del punto o los puntos de esparcimiento que sienten la perturbación. La sección perturbada de la fibra óptica es de 2 m , y como estamos considerando una densidad de 10 puntos de esparcimiento por metro, al menos habrá 20 puntos de esparcimiento que se le modificarán sus coeficientes de reflexión y fase a causa de la variación del índice de refracción producido por la perturbación.

Las tablas 3.1 y 3.2 especifican los valores de variación del índice de refracción Δn_T obtenidos empleando la ecuación 3.13 y un índice promedio de $n_{eff} = 1.456$. para diferentes cambios de temperatura con pasos de 0.05°K .

Tabla 3.1. Valores de Δn_T para cambios de temperatura cada 0.05°K (0.05°K - 0.25°K).

ΔT	0.05°K	0.1°K	0.15°K	0.2°K	0.25°K
Δn_T	0.4914×10^{-6}	0.9828×10^{-6}	1.4742×10^{-6}	1.9656×10^{-6}	2.457×10^{-6}

Tabla 3.2. Valores de Δn_T para cambios de temperatura cada 0.05°K (0.3°K - 0.5°K).

ΔT	0.30°K	0.35°K	0.40°K	0.45°K	0.5°K
Δn_T	2.9484×10^{-6}	3.4398×10^{-6}	3.9313×10^{-6}	4.914×10^{-6}	5.8968×10^{-6}

En forma adicional, sobre los 2 m de fibra óptica sobre los cuales se le está añadiendo una perturbación de temperatura, también se le puede agregar una perturbación causada por tensión tal como se indica en la Figura 3.14. De acuerdo a la Ecuación 3.17, las variaciones

de tensión ϵ introducen cambios de índice de refracción Δn_ϵ . En la práctica, los valores de esfuerzo o tensión que se pueden aplicar a la fibra óptica están del orden de $6\mu\epsilon$ [18], por lo que este valor es usado en nuestras simulaciones.

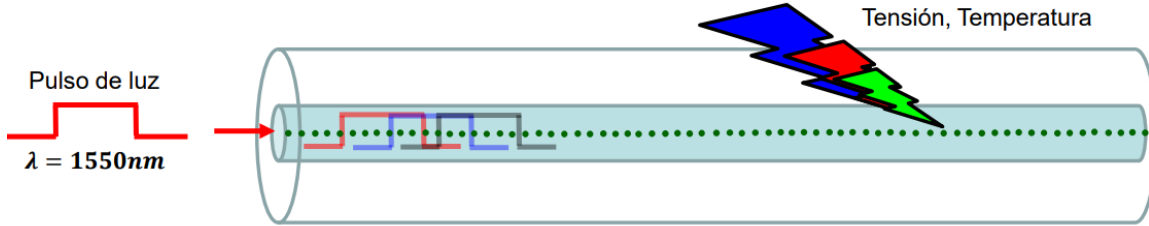


Figura 3.14. Perturbación aplicada mediante variaciones de tensión y temperatura.

En las tablas 3.3 y 3.4 se observan los valores de la variación del índice de refracción Δn en la sección de fibra óptica perturbada por cambios tanto de temperatura y tensión.

Tabla 3.3. Valores de Δn_T para cambios de temperatura cada 0.05°K (0.05°K - 0.25°K) el cual se le suma un cambio adicional Δn_ϵ causado por un esfuerzo de $6\mu\epsilon$.

$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$
7.3754×10^{-6}	7.86682×10^{-6}	8.35822×10^{-6}	8.8496×10^{-6}	9.34202×10^{-6}

Tabla 3.4. Valores de Δn_T para cambios de temperatura cada 0.05°K (0.3°K - 0.5°K) el cual se le suma un cambio adicional Δn_ϵ causado por un esfuerzo de $6\mu\epsilon$.

$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$	$\Delta n_T + \Delta n_\epsilon$
9.83242×10^{-6}	10.3238×10^{-6}	10.8153×10^{-6}	11.7980×10^{-6}	12.7808×10^{-6}

En general, empleando solo perturbaciones de temperatura, o perturbaciones combinadas de temperatura y tensión podemos obtener diferentes variaciones del índice de refracción. A continuación, se simularán trazas ϕ -ODTR con una variación de índice de refracción en una sección de fibra óptica que va de la posición 1000m hasta 1002m. En particular se utilizan las siguientes dos variaciones de índice de refracción: $\Delta n = 2.457 \times 10^{-6}$ y $\Delta n = 12.7808 \times 10^{-6}$, las cuales pueden ser causadas por una u otra perturbación en forma independiente o combinadas.

Cabe recordar que se sigue la metodología de la Figura 3.12, en donde se promedian 200 trazas sin perturbación y luego se promedian 200 trazas con perturbación, y luego se restan entre sí para visualizar el efecto de la perturbación sobre la traza.

En estas simulaciones se usaron puntos de esparcimientos distribuidos uniformemente a lo largo de la fibra óptica.

En las Figura 3.15, 3.16, y 3.17 se observan las trazas ϕ -ODTR correspondientes a la amplitud, fase, y potencia de la luz reflejada por los puntos de esparcimiento que se encuentran a lo largo de la fibra óptica y con una perturbación aplicada entre 1000m y 1002m para un valor de $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$.

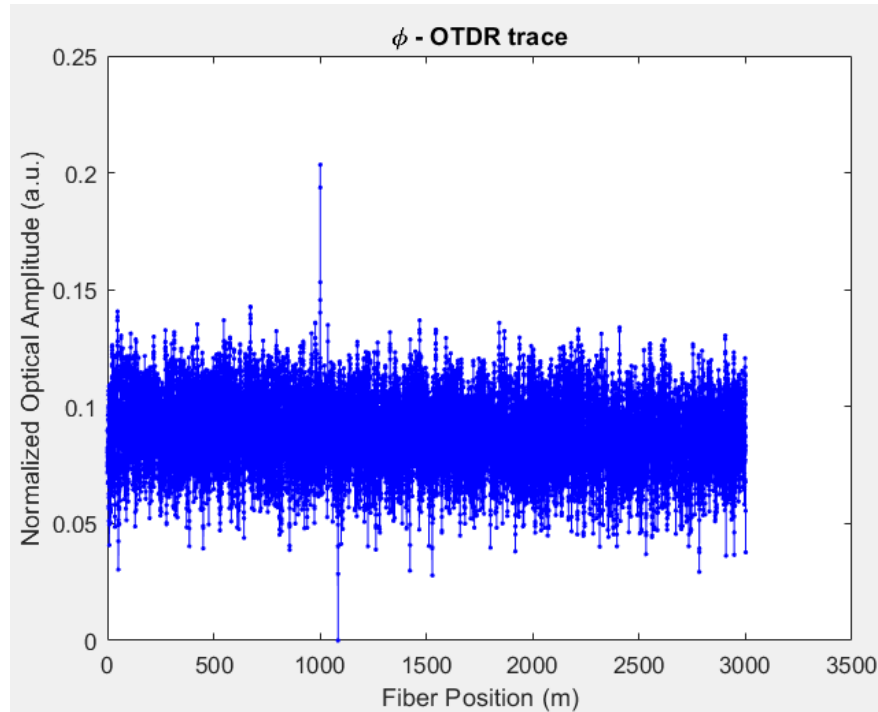


Figura 3.15. Traza ϕ -ODTR de amplitud normalizada vs. longitud de la fibra óptica con $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$.

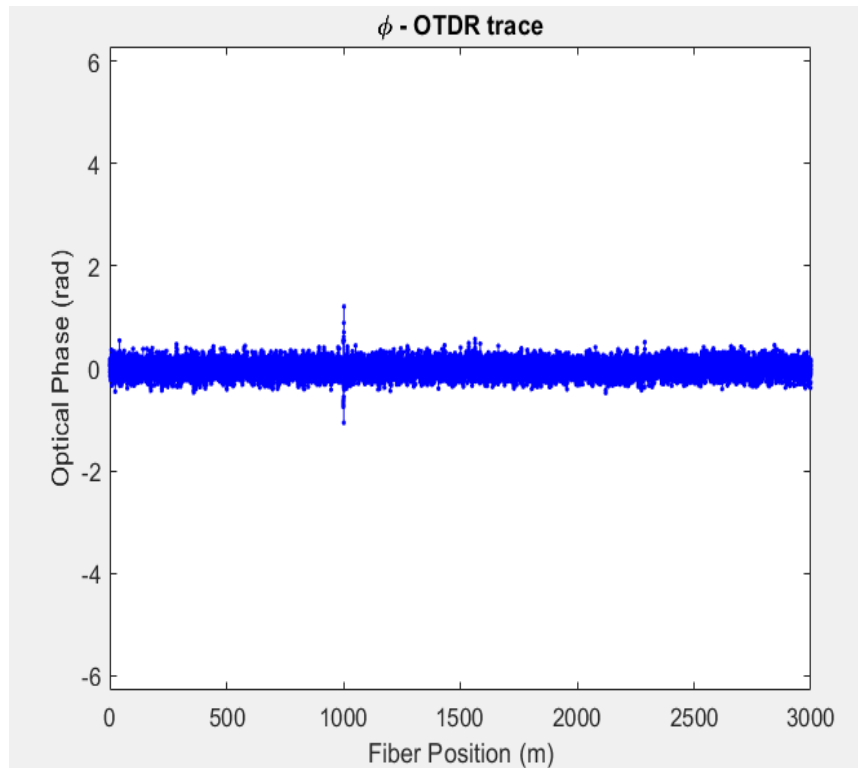


Figura 3.16. Traza ϕ -ODTR de fase vs. longitud de la fibra óptica con $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$.

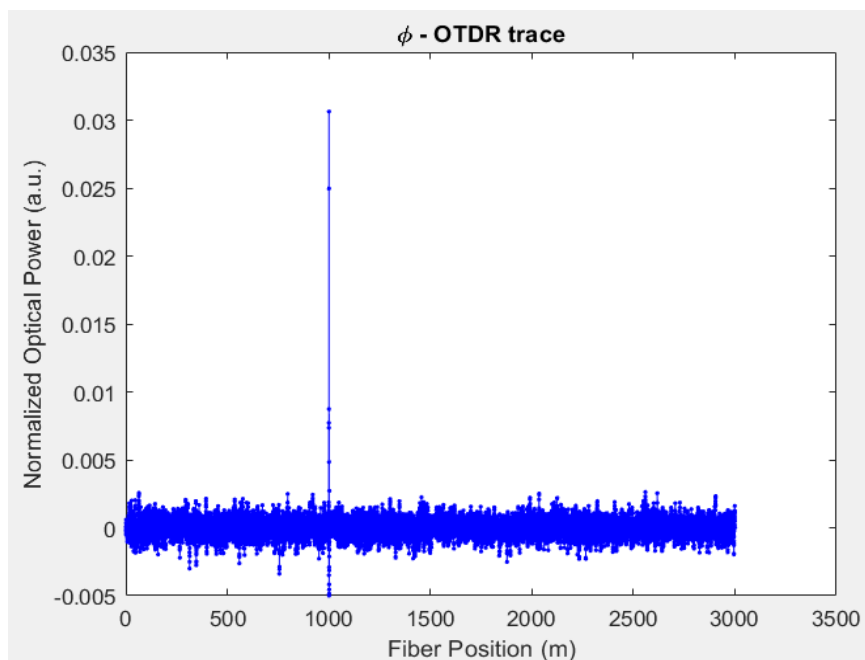


Figura 3.17. Traza ϕ -ODTR de potencia normalizada vs. longitud de la fibra óptica con $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$.

En las Figuras anteriores se observa que siguiendo el procedimiento de la Figura 3.12, se puede hacer visible el efecto del cambio de índice de refracción en la sección de fibra perturbada.

En las Figuras 3.18, 3.19, y 3.20 se observa cómo mientras mayor sea la variación en el índice de refracción más notable se hace la perturbación en la fibra. En estas nuevas gráficas se considera un $\Delta n = 12.7808 \times 10^{-6}$.

En el final de la fibra se observa la reflexión de Fresnel debido al cambio del índice de refracción.

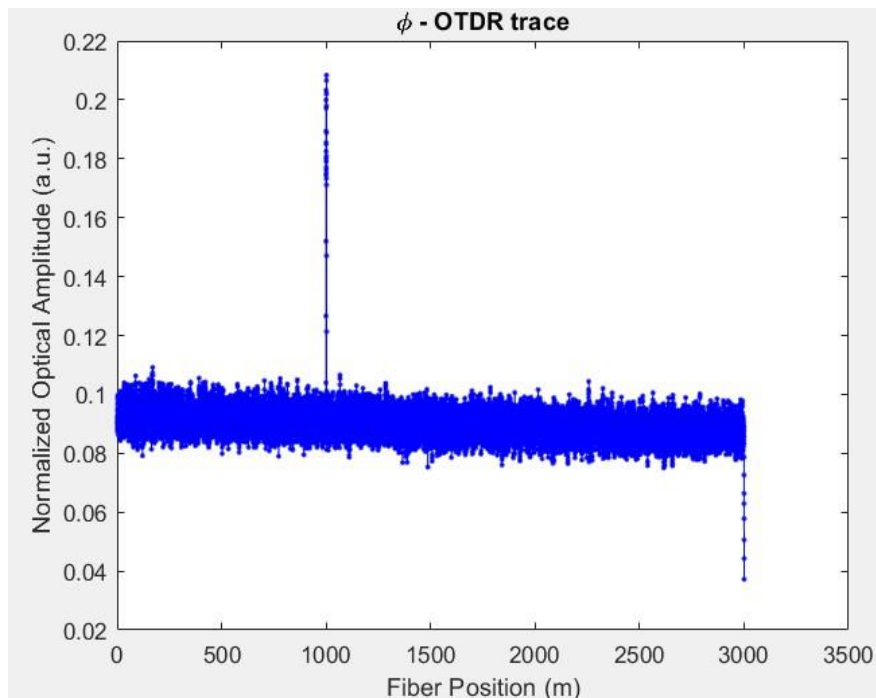


Figura 3.18. Traza ϕ -ODTR de amplitud normalizada vs. longitud de la fibra óptica con $\Delta n = 12.7808 \times 10^{-6}$.

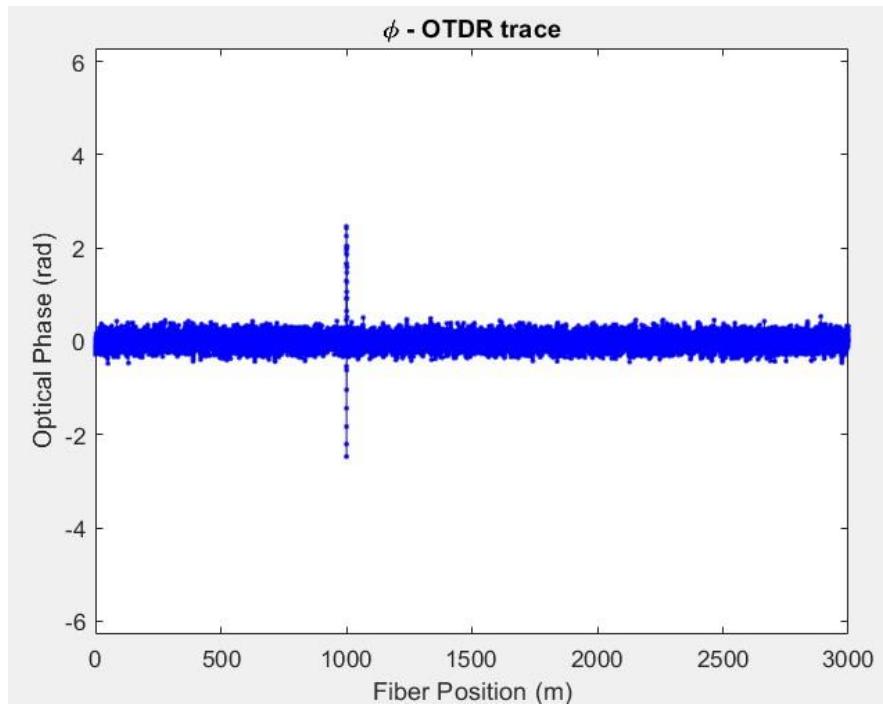


Figura 3.19. Traza ϕ -ODTR de fase vs. longitud de la fibra óptica con $\Delta n = 12.7808 \times 10^{-6}$.

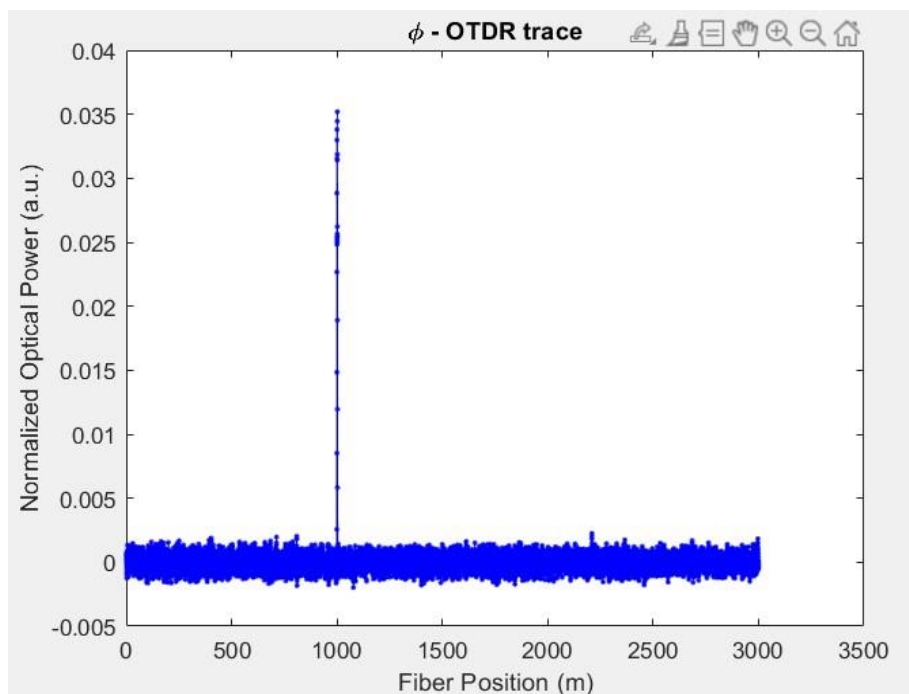


Figura 3.20. Traza ϕ -ODTR de potencia normalizada vs. longitud de la fibra óptica con $\Delta n = 12.7808 \times 10^{-6}$.

Podemos confirmar que los valores de Δn al aumentar en forma progresiva mediante cambios de tensión y temperatura, en los gráficos de las trazas de amplitud, potencia óptica y fase se hace más visible la perturbación. En la Figura 3.21 se describe como varia la amplitud del pico de la perturbación a medida que aumenta el valor de Δn .

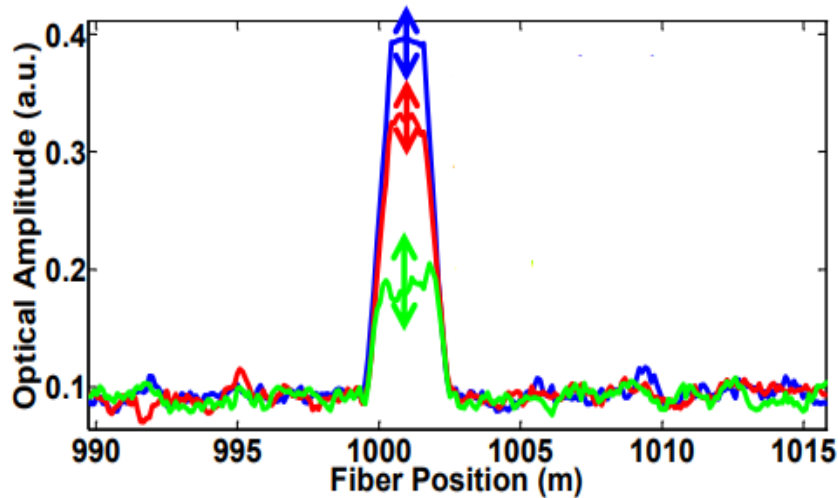


Figura 3.21. Cambios en la amplitud del pico de la perturbación debido a variaciones de Δn causados por temperatura y tensión aplicada en una sección de la fibra óptica.

Los cambios del pico de la amplitud de la perturbación mostrados en la Figura 3.21 ante diferentes cambios de Δn causados por cambios de temperatura y tensión nos permite determinar con que sensibilidad las trazas ϕ -ODTR permiten detectar o visualizar perturbaciones. En este sentido, se procede a realizar un barrido de valores de Δn para determinar con que razón cambia el pico de la perturbación observado en la Figura 3.21, y de ahí determinar una pendiente de comportamiento y la sensibilidad del sistema.

3.5.1 Sensibilidad del sistema ϕ -ODTR con puntos de esparcimiento ordenados uniformemente y coeficiente de reflexión aleatorio.

Para la simulación de la sensibilidad de las trazas ϕ -ODTR se sigue el esquema numérico mostrado en la Figura 3.22, en donde a partir de un barrido de valores de Δn se monitorean los valores de los picos de la perturbación que aparecen en las gráficas de las trazas de potencia mostradas en la sección anterior y justamente en la parte de la fibra donde se ejerce dicha perturbación que es entre 1000m y 1002m respectivamente.

Es importante recordar que estas trazas se han obtenido considerando puntos de esparcimiento distribuidos uniformemente a lo largo de la fibra óptica y considerando que

cada punto de esparcimiento genera una reflexión del haz de luz con un coeficiente de reflexión aleatorio dado por la Ecuación 3.4.

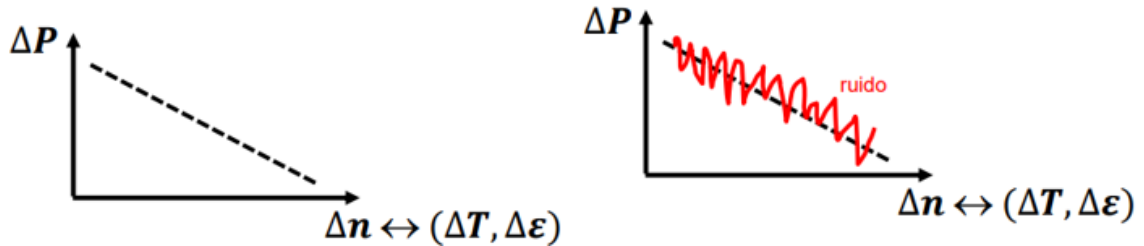


Figura 3.22. Representación de la variación de potencia óptica en función de los cambios de Δn .

La Figura 3.22 hace referencia a que el valor máximo de potencia del pico de la perturbación que aparece en las trazas ϕ -ODTR debe cambiar conforme se modifica el índice de refracción Δn causado por una perturbación en temperatura o tensión. Usualmente uno espera que el comportamiento de la gráfica sea suave y lineal para que se pueda determinar una pendiente de la curva que indique la sensibilidad del sistema para detectar perturbaciones tal como se muestra en la parte derecha de la Figura 3.22, sin embargo, esto no sucede en la realidad, ya que dicha curva presenta variaciones causadas por ruido estocástico, el cual viene ilustrado en color rojo en la parte izquierda de la Figura 3.22. Lo anterior se debe a que las trazas ϕ -ODTR se generan a partir de coeficientes de reflexión y fases aleatorias en cada punto de esparcimiento a lo largo de la fibra óptica. Por lo tanto, para calcular la pendiente de dicha curva con ruido se deberán realizar aproximaciones basadas en regresiones lineales para calcular la pendiente y por tanto su sensibilidad.

La pendiente de la recta aporta información de que tan sensible es el sistema para detectar la perturbación y para que valores de Δn es más visible.

Cuando se procede a utilizar las trazas ϕ -ODTR simuladas en potencia para obtener las gráficas del tipo de la Figura 3.22, obtenemos los resultados de la Figura 3.23.

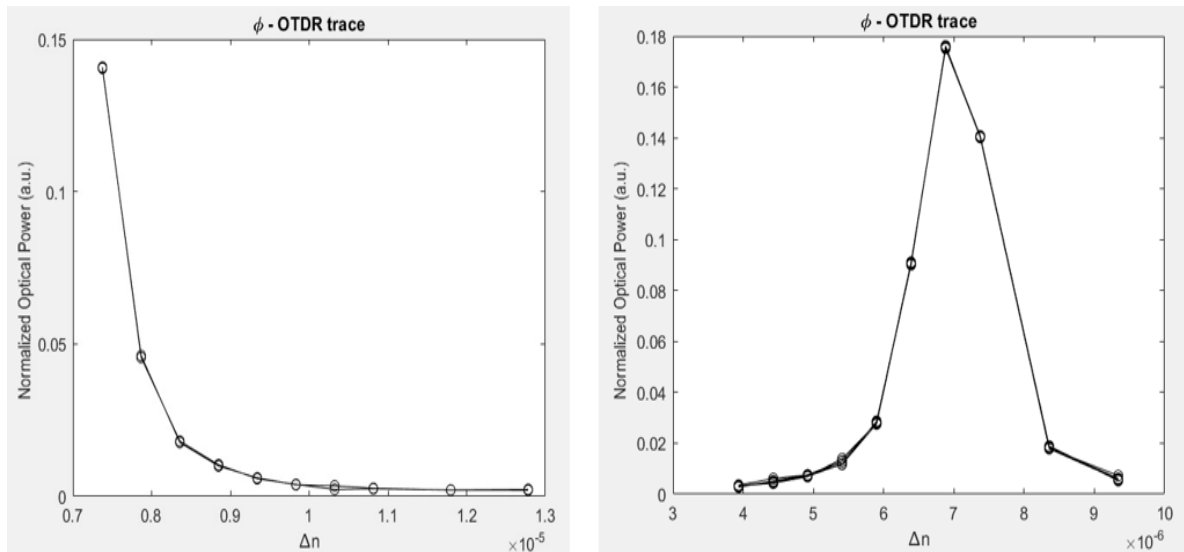


Figura 3.23. Representación de la variación de potencia óptica en función de los cambios de Δn .

Se observa que para algunos cambios de Δn el sistema es más sensible. Estas gráficas se repitieron 10 veces y se encimaron una con otra obteniendo el mismo resultado. En las curvas obtenidas hay zonas donde su pendiente está más inclinada, entonces el sistema ϕ -ODTR tiene una alta sensibilidad y si la pendiente está poco inclinada, el método posee una baja sensibilidad. Al ver el comportamiento de la Figura 3.23, se procede a obtener la misma gráfica, pero ahora usando un mayor rango de variaciones en Δn para interpretar de una mejor manera los resultados, dando como resultado la gráfica de la Figura 3.24.

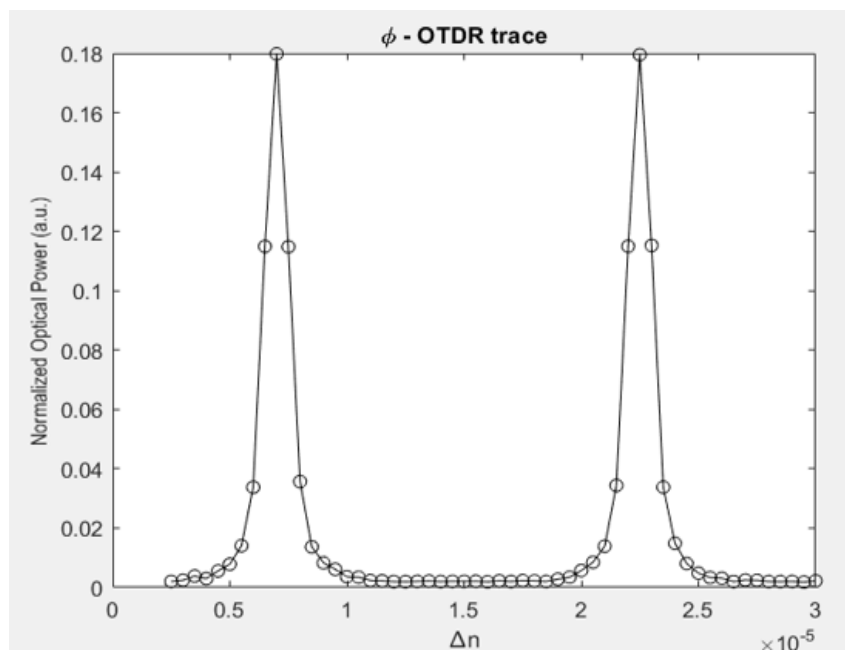


Figura 3.24. Gráfica de cambios de potencia del pico de perturbación en función de Δn .

En la gráfica de la Figura 3.24 se reafirma la observación anterior de que para algunos cambios de Δn el sistema es más sensible debido a que la curva presenta una pendiente con una máxima inclinación, y en otros rangos de Δn la curva presenta una pendiente casi horizontal y en esas zonas es menos sensible para detectar perturbaciones. Centrándonos en la parte de la curva que presenta una mayor inclinación, se procede a calcular la pendiente de la curva usando la técnica de regresión lineal empleando el método de mínimos cuadrados.

Con la técnica de regresión lineal se traza un gráfico lineal entre dos variables de datos, x e y en este caso, x corresponde a los cambios en Δn , mientras que y corresponde al valor del pico máximo de potencia presente en la traza correspondiente a la perturbación. Para hacer una estimación del modelo de regresión lineal simple [22], se busca una recta de la forma:

$$y = mx + n \quad (3.16)$$

En este caso se utiliza el método de mínimos cuadrados para determinar la pendiente de la recta m . En la Figura 3.25 se visualiza el máximo valor que puede tomar la pendiente en un rango de valores de $\Delta n = 0.52 \times 10^{-5} : 0.72 \times 10^{-5}$, indicando que en ese rango la sensibilidad del ϕ -ODTR es alta, en otro rango de $\Delta n = 0.21 \times 10^{-5} : 0.51 \times 10^{-5}$ la pendiente y la sensibilidad es menor, y en el rango de $\Delta n = 0.52 \times 10^{-5} : 0.72 \times 10^{-5}$, la pendiente es cero y la sensibilidad del sistema para detectar perturbaciones es mínima.

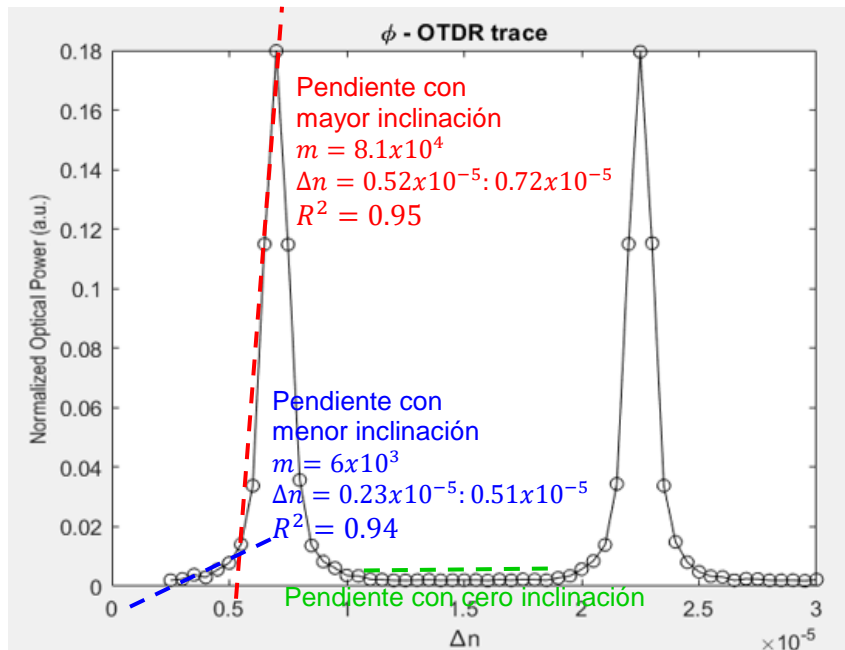


Figura 3.25. Pendientes con mayor inclinación y menor inclinación de la curva de cambios de potencia del pico de perturbación en función de Δn .

De acuerdo a la Figura 3.25, se puede observar que hay varias regiones de la curva donde la pendiente puede ser máxima obteniendo con ello una máxima sensibilidad del sistema. En este caso, el sistema ϕ -ODTR podrá operar con una alta sensibilidad dentro de esas regiones de operación, es decir, el ϕ -ODTR podrá detectar con mayor eficacia aquellas perturbaciones por temperatura y tensión que generen los rangos de variación de Δn que hacen que las pendientes de la Figura 3.25 sean máximas respectivamente.

3.5.2 Sensibilidad del sistema ϕ -ODTR con puntos de esparcimiento ordenados aleatoriamente y coeficiente de reflexión dependiente del índice de refracción.

Ahora se repite el análisis de sensibilidad del sistema ϕ -ODTR, pero empleando otra forma de obtener las trazas, y que consiste en 2 modificaciones, la primera es considerar puntos de esparcimiento distribuidos aleatoriamente a lo largo de los 3km de fibra óptica, y la segunda es que cada punto de esparcimiento posea un coeficiente de reflexión dado por:

$$r(z) = n(z_i) - n(z_{i+1}) / n(z_i) + n(z_{i+1}) \quad (3.17)$$

Donde $n(z_i)$ y $n(z_{i+1})$ son los índices de refracción de dos puntos de esparcimiento consecutivos en las posiciones z_i y z_{i+1} respectivamente. En este caso, los índices de refracción $n(z_i)$ y $n(z_{i+1})$ serán diferentes debido a que cada punto de esparcimiento presenta un diferente índice de refracción diferente que cambia aleatoriamente de acuerdo a la Ecuación 3.5.

Esta forma de calcular las trazas considerando las dos modificaciones mencionadas haría que la simulación sea físicamente más representativa de cómo se obtienen experimentalmente.

Todas las demás condiciones que se usaron para obtener la gráfica de la Figura 3.25 fueron consideradas en esta nueva simulación, obteniendo como resultado la gráfica de la Figura 3.26.

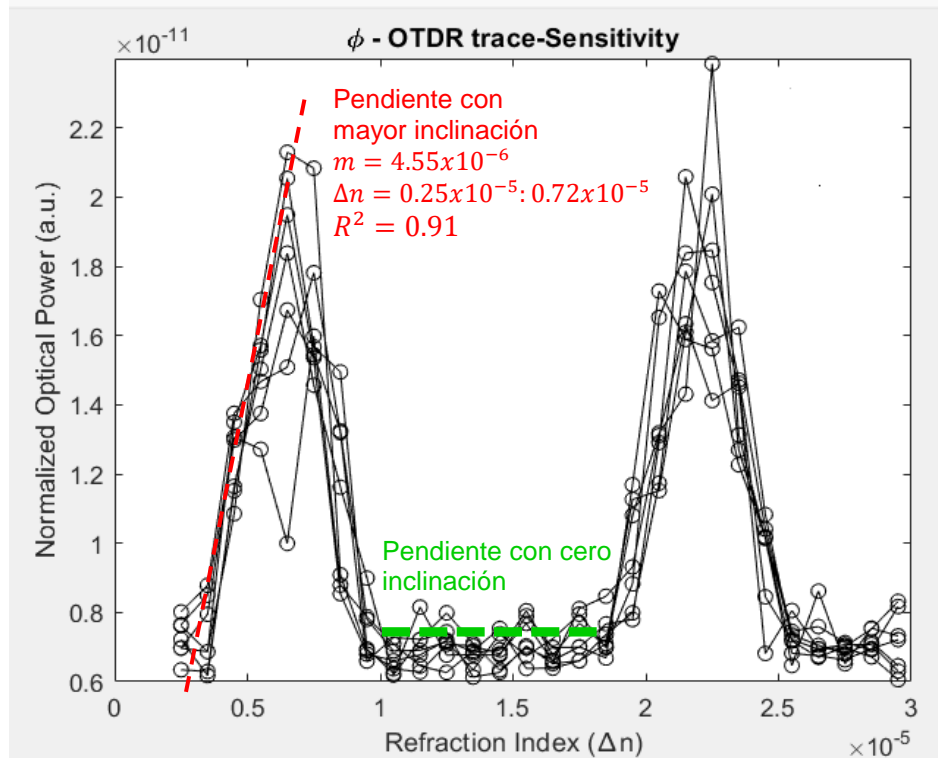


Figura 3.26. Pendientes con mayor inclinación y menor inclinación de la curva de cambios de potencia del pico de perturbación en función de Δn usando la simulación modificada.

Cuando se comparan las gráficas de las Figuras 3.25 y 3.26 podemos observar que siguen apareciendo regiones donde se encuentran pendientes máximas y regiones donde la pendiente es cero. En particular, en ambas figuras se siguen observado dos crestas cuyos máximos están colocados en las mismas posiciones de Δn . Solo que el ancho de las crestas de la Figura 3.26 es mayor con respecto a las crestas de la Figura 3.25 las cuales son más delgadas. Este hecho hace que ahora solo se pueda sacar una pendiente de color rojo en La Figura 3.26 en comparación con la Figura 3.25 en donde por la delgadez de sus crestas si se pudieron identificar dos pendientes de color rojo y azul.

Otro dato importante es que el valor de la pendiente máxima de color rojo se modificó en la Figura 3.26 debido a la forma diferente en cómo se calcularon los coeficientes de reflexión. Sin embargo, a pesar de ello, se puede afirmar que las dos formas de simulación coinciden notablemente en la presencia de regiones de mayor sensibilidad para detectar perturbaciones.

A continuación, en el siguiente capítulo se profundizará en el análisis de los resultados de sensibilidad de las Figuras 3.25 y 3.26 pero considerando ahora fibras ópticas con diferentes dopantes de Dióxido de Germanio (GeO_2) en su núcleo, tal como ocurre con los diferentes tipos de fibras ópticas monomodo comerciales que hay en el mercado, y se estudiará como impacta estos dopantes en la sensibilidad del sistema ϕ -ODTR para detectar perturbaciones en un punto o sección de la fibra óptica dopada.

CAPÍTULO 4

Simulación del sistema ϕ -OTDR con y sin perturbación en fibras ópticas dopadas.

En el proceso de fabricación de fibras ópticas se utiliza dióxido de silicio y se incorporan dopantes que modifican el valor del índice de refracción de núcleo y revestimiento para lograr una diferencia entre ellos. El núcleo de la fibra óptica esta dopado con aditivos de Germanio, Boro y Flúor para aumentar el valor del índice de refracción, mientras que, el revestimiento en la mayoría de las ocasiones se mantiene sin dopar.

En este capítulo se simulan las variaciones en el índice de refracción debidas a cambios en la concentración de germanio y silicio en el núcleo de la fibra y su impacto en la sensibilidad del sistema ϕ -OTDR para la detección de perturbaciones.

4.1 Fibras ópticas dopadas GeO_2 - SiO_2 .

Las fibras ópticas constituyen un guía de onda de material dieléctrico normalmente fabricadas con vidrio Sílice (SiO_2). Durante el proceso de fabricación se le añaden óxidos metálicos para que las uniones de oxígeno y silicio sean menos fuertes y se produzcan cambios en la composición física del vidrio como variaciones del índice de refracción y el coeficiente de expansión térmica. Para controlar la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y revestimiento se introducen diferentes dopantes en el núcleo, con esto se logra variar el índice de refracción de las fibras de Sílice puras [23].

Para el dopaje de las fibras ópticas de Sílice se utilizan óxidos o cloruros en pequeños porcentajes como el Dióxido de Germanio (GeO_2) o Fósforo para lograr el incremento en el índice de refracción, y Boro para reducirlo. La cantidad de dopante añadida al vidrio de Sílice debe ser considerado cuidadosamente debido a una variedad de cambios que pueden ocurrir.

El Dióxido de Germanio (GeO_2) representa un material potencial para fibras ópticas por tener menos pérdidas de transmisión que otros dopantes. El retro-esparcimiento de Rayleigh está determinado por la densidad que tiene el vidrio en el núcleo de la fibra óptica, y que depende del porcentaje de la componente de GeO_2 que se ha añadido al núcleo de la fibra.

En el capítulo anterior se analizaron las repercusiones de los cambios de índice de refracción de la fibra óptica Δn introducidos por la perturbación en forma de tensión o temperatura aplicada, pero estos siempre se aplicaron sobre un índice de refracción promedio del núcleo $n_{eff} = 1.456$. En este sentido, diferentes porcentajes de dopantes de GeO_2 hacen que este índice de refracción promedio se incremente. Para analizar la influencia del aumento de los dopantes en el núcleo de la fibra se determina la ecuación de Sellmeier que proporciona el índice de refracción correspondiente para diferentes concentraciones molares de GeO_2 [23, 24].

4.1.1 Ecuación de Sellmeier en fibras ópticas dopadas.

El sistema de vidrio GeO_2 - SiO_2 tiene importantes aplicaciones en comunicaciones ópticas. El vidrio de GeO_2 tiene una ventana de pérdida óptica más baja a los vidrios que contienen SiO_2 [25].

Los parámetros de Sellmeier permiten modelar el valor del índice de refracción de todas las composiciones de GeO_2 - SiO_2 . Dicha ecuación brinda de forma precisa una representación matemática para hallar el índice de refracción considerando los porcentajes de cada material con que está compuesto el vidrio. En general, la composición del vidrio se puede variar por la suma controlada de otra componente.

Para poder comprender las características y propiedades ópticas de los vidrios de GeO_2 - SiO_2 se analiza la siguiente ecuación de Sellmeier.

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + X(GA_i - SA_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [SL_i + X(GL_i - SL_i)^2]} \quad (4.1)$$

Donde n es el índice de refracción promedio, SA_i , SL_i , GA_i , GL_i son los coeficientes de Sellmeier para los vidrios de SiO_2 y GeO_2 respectivamente, con $i = 1, 2, 3$, y X es la fracción molar de GeO_2 .

En la tabla 4.1 se muestran los coeficientes de Sellmeier que se utilizaron en este trabajo para variar el índice de refracción promedio en la fibra y evaluar el comportamiento de la potencia y amplitud óptica en las trazas ϕ -OTDR.

Tabla 4.1. Coeficientes de Sellmeier para SiO₂ y GeO₂ utilizados en este trabajo [27].

	A_1	l_1	A_2	l_2	A_3	l_3
SiO ₂	0.696166	0.0684043	0.4079426	0.116241	0.897479	9.8961661
GeO ₂	0.806866	0.0689726	0.71815848	0.153966	0.854168	11.841931

Entonces, el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica varía de acuerdo con la concentración de dopantes del Dióxido de Germanio determinada por la fracción molar X en la Ecuación 4.1 y utilizando en dicha ecuación los coeficientes dados en la Tabla 4.1 respectivamente.

4.2 Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con fibras ópticas dopadas.

Con el fin de comprender las propiedades ópticas de los vidrios de GeO₂-SiO₂ a lo largo de todo el sistema ϕ -OTDR debe analizarse los valores de potencia y amplitud óptica obtenidos en la traza luego de añadir la concentración de dopantes en la fibra.

La intención es investigar si un incremento de concentración de GeO₂ en el núcleo de la fibra hace que sea más sensible el sistema ϕ -OTDR a los cambios externos que determinan cambios en el índice de refracción [23].

Para cada cambio de concentración de GeO₂ en el núcleo de la fibra óptica se debe verificar que las trazas ϕ -OTDR obtenidas por simulación mantengan las características estadísticas descritas en el Capítulo 3. Es decir, el histograma de las trazas de amplitud normalizada debe seguir una distribución de probabilidad de Rayleigh, el histograma de las trazas de potencia normalizada debe seguir una distribución de probabilidad exponencial, y el histograma de los valores de fase de la traza debe seguir una distribución de probabilidad uniforme, respectivamente. Una vez aseguradas estas características en las trazas obtenidas con diferentes dopantes de GeO₂ en el núcleo de la fibra, se puede hacer un estudio comparativo de las trazas simuladas con varios índices de refracción del núcleo dados por el aumento de la concentración molar en el núcleo de la fibra y así analizar el impacto de estas concentraciones en la forma de las trazas con y sin perturbaciones externas.

4.2.1 Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con fibras ópticas dopadas. Puntos de esparcimiento ordenados uniformemente.

Para la simulación se trabaja con la ecuación de Sellmeier que permite variar la concentración de GeO_2 modificando su fracción molar (MF) y con ello hacer cambios en el índice de refracción del núcleo de la fibra. Se validan que las trazas obtenidas sigan las distribuciones de probabilidad descritas en el Capítulo 3.

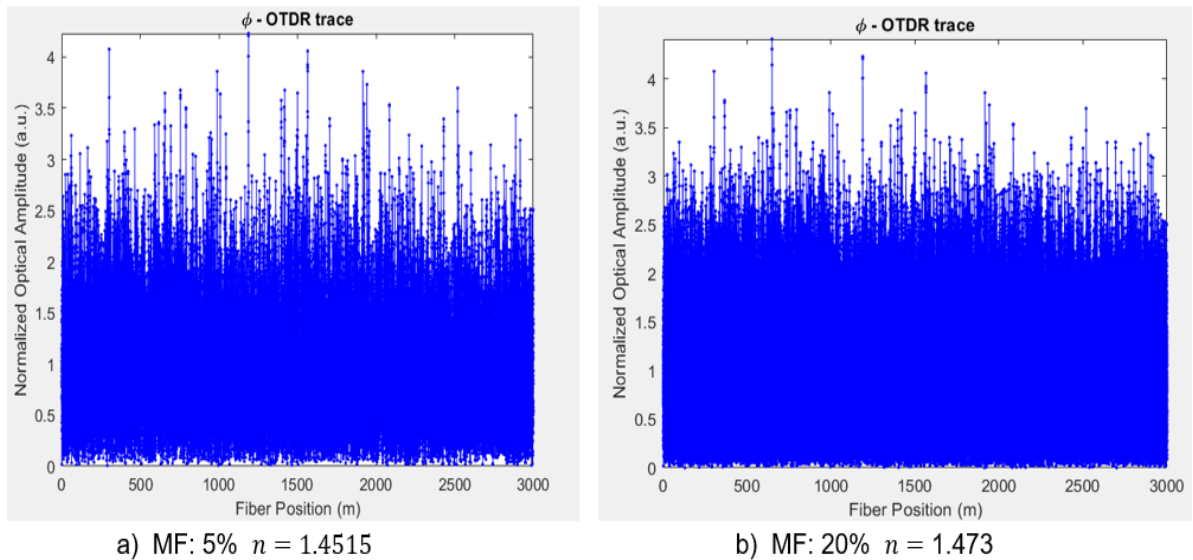


Figura 4.1. Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con amplitud óptica normalizada vs. longitud de fibra para diferentes concentraciones molares de GeO_2 y con puntos de esparcimiento ordenados uniformemente. Fracción Molar de GeO_2 : a) MF: 5%, b) MF: 20%.

Cuando se incrementa la concentración molar se observa un aumento del índice de refracción del núcleo de la fibra, obteniéndose un valor de $n = 1.4515$ para un 5% de fracción molar considerando los coeficientes de Sellmeier descritos en la Tabla 4.1, mientras que para un 20% de fracción molar se obtiene un valor del índice de refracción de $n = 1.473$.

Estas trazas de amplitud normalizada se observan muy similares y cuentan con histogramas que cumplen una distribución de probabilidad de Rayleigh, por lo que representan trazas realistas que pueden obtenerse en forma experimental.

A continuación, se muestran las trazas de potencia óptica normalizada las cuales también cumplen que sus histogramas sigan una distribución de probabilidad exponencial.

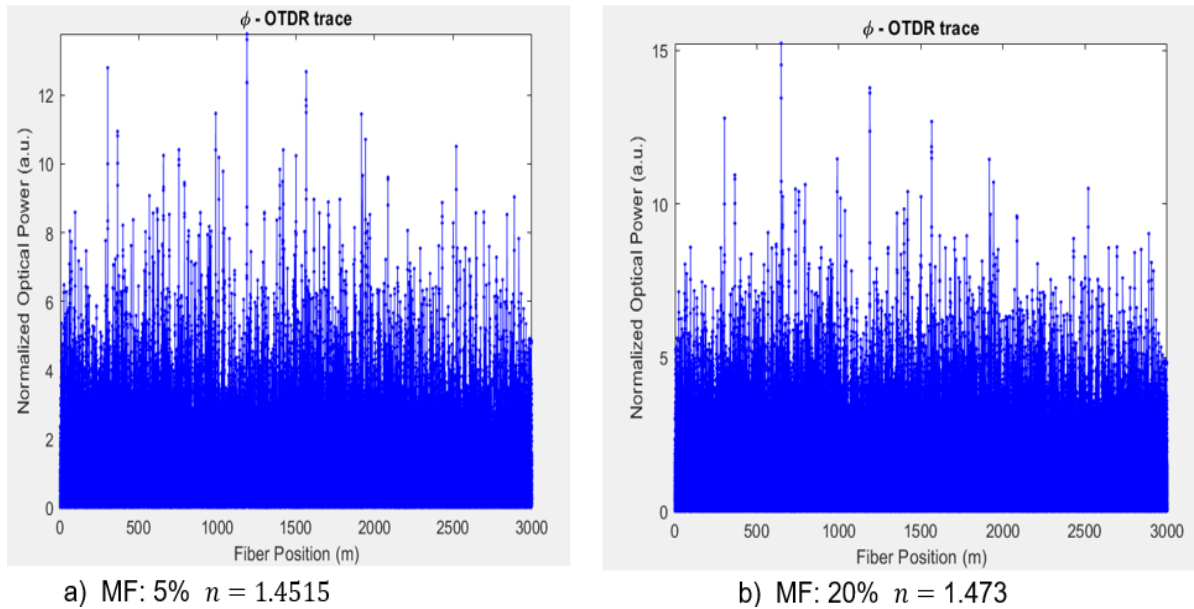


Figura 4.2. Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con potencia óptica normalizada vs. longitud de fibra para diferentes concentraciones de GeO_2 y con puntos de esparcimiento ordenados uniformemente. Fracción Molar de GeO_2 : a) MF: 5%, b) MF: 20%.

De las Figuras 4.1 y 4.2 se puede comentar que un aumento de la concentración de dopantes en el núcleo de la fibra proporciona trazas similares en forma visual, aunque hay que recordar que estas trazas fueron adquiridas considerando una longitud de fibra óptica de 3km sin perturbaciones. Por lo que todavía falta analizar el caso con perturbaciones.

Para el caso de las fases de las trazas de amplitud, estas también cumplen que sus histogramas obedezcan una distribución de probabilidad uniforme.

Por el momento restringiremos el análisis de nuestro estudio a las trazas de amplitud y potencia normalizada para simplificar el análisis comparativo cuando introduzcamos perturbaciones a la fibra óptica en una sección de 2m desde la posición 1000m hasta 2002m respectivamente.

4.2.2 Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con fibras ópticas dopadas. Puntos de esparcimiento ordenados aleatoriamente.

En el capítulo 3 se analizó que la distribución de los puntos de esparcimiento, ya sea en forma uniforme o aleatoria, a lo largo de la fibra óptica no determina el patrón de interferencia de la traza, no obstante, se evalúa el comportamiento de ellas cuando los puntos de esparcimiento se encuentran ordenados aleatoriamente y se modifica la concentración molar de GeO_2 para propósitos comparativos.

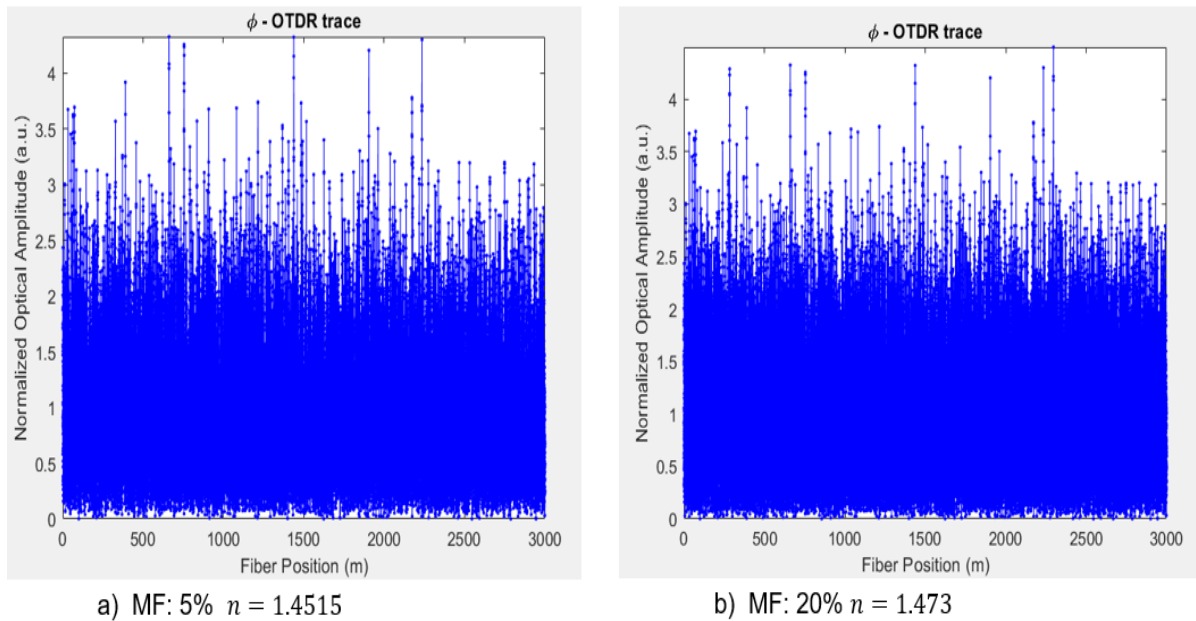


Figura 4.3. Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con amplitud óptica normalizada vs. longitud de fibra para diferentes concentraciones molares de GeO_2 y con puntos de esparcimiento ordenados aleatoriamente. Fracción Molar de GeO_2 : a) MF: 5% ,b) MF: 20%.

De la misma forma que en el caso anterior considerando puntos de esparcimiento distribuidos uniformemente, cuando se incrementa la concentración molar se observa un aumento del índice de refracción del núcleo de la fibra, y las trazas de amplitud normalizada se observan muy similares y cuentan con histogramas que cumplen una distribución de probabilidad de Rayleigh.

A continuación, se muestran las trazas de potencia óptica normalizada las cuales también cumplen que sus histogramas sigan una distribución de probabilidad exponencial.

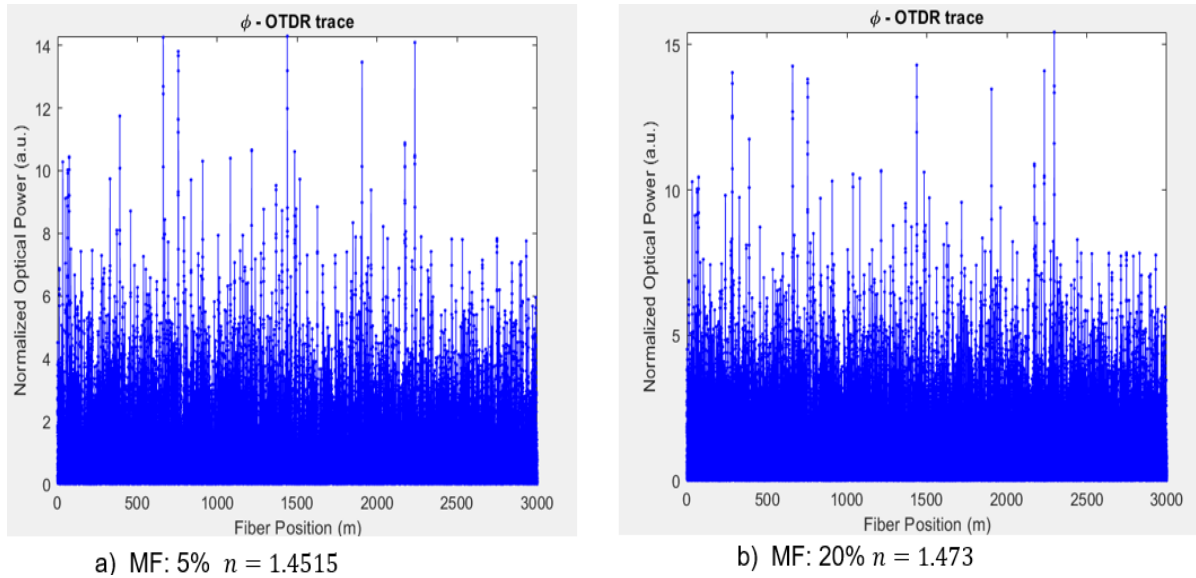


Figura 4.4. Trazas ϕ -OTDR sin perturbación con potencia óptica normalizada vs. longitud de fibra para diferentes concentraciones de GeO_2 y con puntos de espacimient ordenados aleatoriamente. Fracción Molar de GeO_2 : a) MF: 5% ,b) MF: 20%.

Se sostiene el resultado mostrado en la sección anterior, en donde mientras mayor sea la concentración de dopantes el índice de refracción se incrementa, pero las trazas se aprecian bastante similares y conservan sus características típicas de distribución de probabilidad.

Para analizar el caso de trazas de amplitud y potencia normalizada ya sea utilizando puntos de espacimient uniformes o aleatorios a lo largo de la fibra, se considerará la introducción de perturbaciones a la fibra óptica en una sección de 2m desde la posición 1000m hasta 2002m.

4.3 Trazas ϕ -OTDR con perturbación en fibras ópticas dopadas.

Para la simulación de la perturbación en fibras ópticas con diferentes concentraciones de GeO_2 se varió su concentración molar para poder influir en los cambios de índice de refracción promedio del núcleo de la fibra. Adicionalmente se introducen variaciones del índice de refracción Δn causados por una tensión y temperatura de acuerdo a las expresiones (3.13) y (3.17).

En las fibras monomodo utilizadas se considera el efecto de las concentraciones de GeO_2 en el núcleo dopado $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$, donde para concentraciones más altas de GeO_2 , el índice de refracción promedio del núcleo aumenta. En particular se busca cuantificar los efectos de la concentración de GeO_2 en la sensibilidad del sistema para detectar perturbaciones externas.

Los cambios externos provocados por una perturbación inducen una variación en el índice de refracción Δn justamente en la sección de la fibra donde se ejerce la perturbación. Cuando se tiene fibras con diferente fracción molar de GeO_2 la sensibilidad se modifica.

En la simulación se considera la fórmula Sellmeier para calcular el índice de refracción del núcleo dopado con $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ para diferentes valores de fracción molar de GeO_2 . Se emplean diferentes concentraciones entre 1% y 20% de concentración molar de GeO_2 dentro de la matriz de Sílice y se encuentra que el índice de refracción promedio resultante del núcleo de la fibra se encuentra entre 1.44 y 1.473 manteniendo un comportamiento monomodal.

También es importante recalcar que, en las simulaciones con perturbación, para poder visualizar dichas perturbaciones, se realiza el procedimiento descrito en la Figura 3.12, en donde se promedian 200 trazas obtenidas sin perturbación, y se promedian otras 200 trazas obtenidas con perturbación, y posteriormente se realiza la diferencia de estos dos promedios. Como resultado de este procedimiento se obtienen las gráficas de las Figuras 4.5, 4.6, y 4.7 que corresponden a la visualización de perturbaciones para las trazas en amplitud normalizada, de fase (en radianes), y de potencia normalizada, mostrando en cada una de ellas una perturbación con un cambio de índice de refracción $\Delta n = 2.5 \times 10^{-6}$ entre 1000m y 1002m. Estas simulaciones son indiferentes si se realizan con centros de esparcimiento distribuidos aleatoriamente o uniformemente a lo largo de la fibra óptica. Asimismo, estas fueron obtenidas considerando una fracción molar de GeO_2 de MF:20% la cual genera un índice de refracción promedio en el núcleo de la fibra de 1.473.

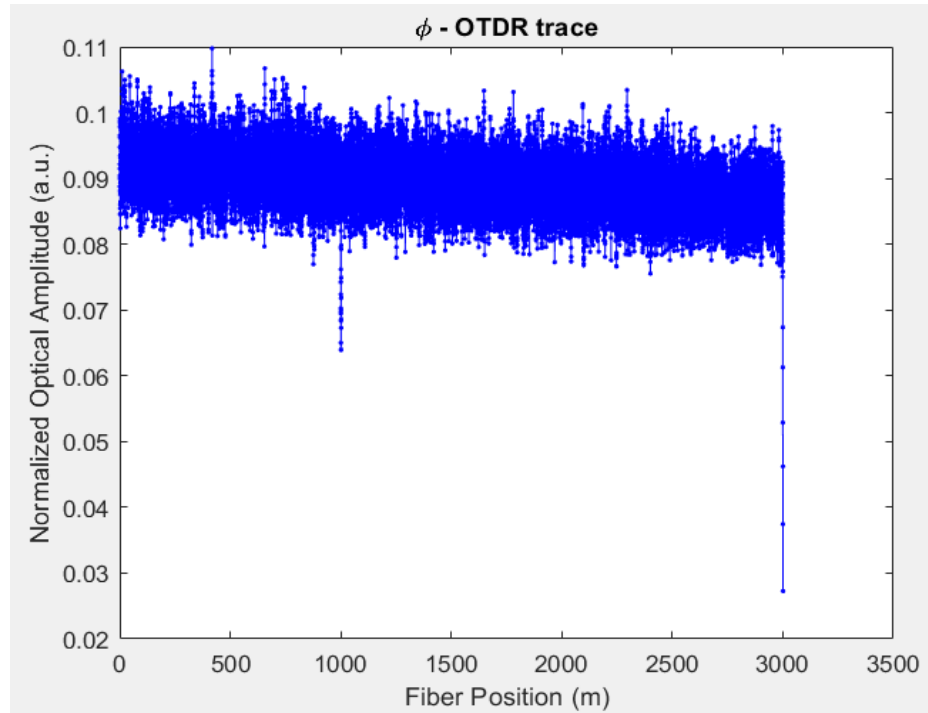


Figura 4.5. Trazas ϕ -OTDR de amplitud óptica normalizada vs. longitud de fibra óptica con perturbación entre 1000m y 1002m. Fracción Molar de GeO_2 : MF:20%.

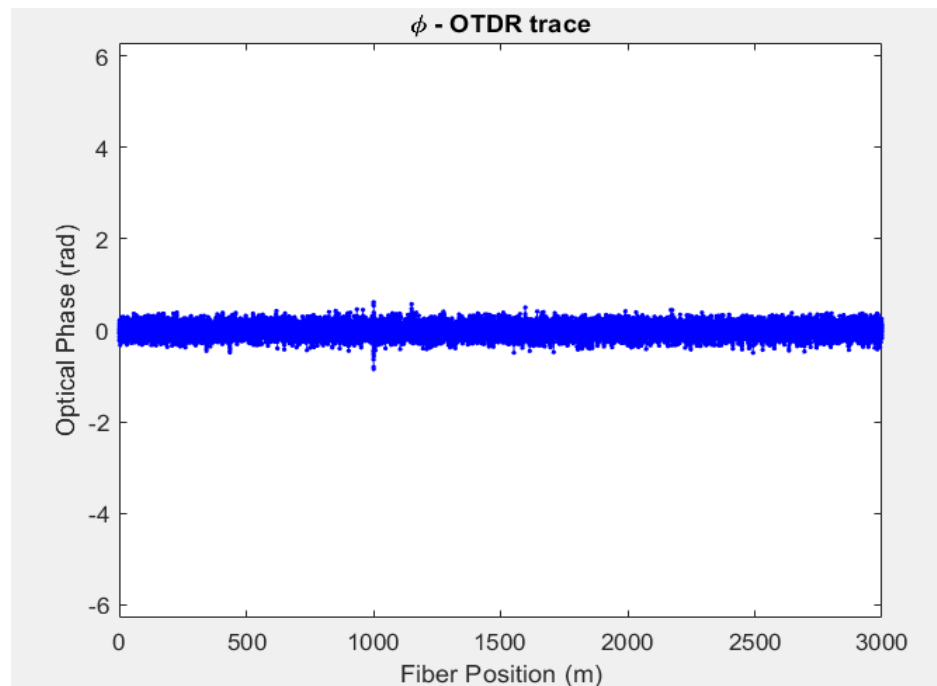


Figura 4.6. Fase Óptica (rad) de las Trazas ϕ -OTDR vs. longitud de fibra óptica con perturbación entre 1000m y 1002m. Fracción Molar de GeO_2 : MF:20%.

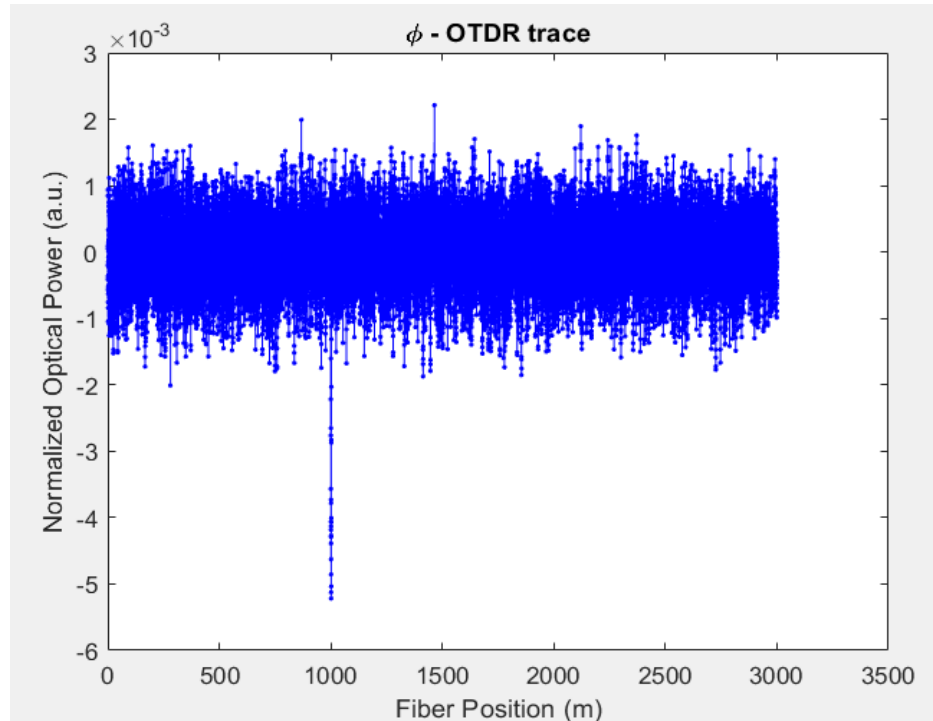


Figura 4.7 Trazas ϕ -OTDR de potencia óptica normalizada vs. longitud de fibra óptica con perturbación entre 1000m y 1002m. Fracción Molar de GeO_2 : MF:20%.

Para poder comprobar que sucede con la visualización de las perturbaciones en las trazas a medida que cambia el índice de refracción promedio del núcleo debido al aumento de la concentración de dopantes de GeO_2 , se procede a realizar un estudio con una serie de perturbaciones que generen un rango de valores de Δn en una sección de fibra óptica pero ahora considerando diferentes concentraciones de GeO_2 en la fibra. Esto permitirá determinar cómo se modifica la sensibilidad del sistema ϕ -OTDR para detectar una perturbación ante la variación de la concentración de GeO_2 . Dicho estudio se realiza considerando los siguientes dos casos: el primero consiste en tomar puntos de esparcimiento ordenados uniformemente y con un coeficiente de reflexión aleatorio, y el segundo consiste en tomar puntos de esparcimiento ordenados aleatoriamente y con el coeficiente de reflexión dependiente del índice de refracción.

4.3.1 Sensibilidad del sistema ϕ -ODTR con puntos de esparcimiento ordenados uniformemente y coeficiente de reflexión aleatorio.

Las perturbaciones de temperatura y tensión se aplican de tal forma que se obtiene un rango de valores de Δn desde 0.25×10^{-5} hasta 3×10^{-5} , y dicha perturbación en Δn se aplica

en una sección de la fibra entre 1000m y 1002m. Asimismo se modifica el índice de refracción promedio del núcleo de la fibra considerando una concentración molar de GeO_2 de 15% y 20%.

En este caso, para una concentración molar de GeO_2 del 15% correspondiente a un índice promedio de la fibra de $n = 1.4664$ y considerando perturbaciones que generen cambios de Δn entre 0.25×10^{-5} y 3×10^{-5} se obtienen los resultados de la Figura 4.8 la cual se obtuvo siguiendo el procedimiento descrito en las Figuras 3.21 y 3.22 del capítulo 3, en donde solo se toma el pico máximo del valor de la perturbación ejercida entre 1000m y 1002m y se monitorea como varía este valor pico ante diferentes valores de Δn .

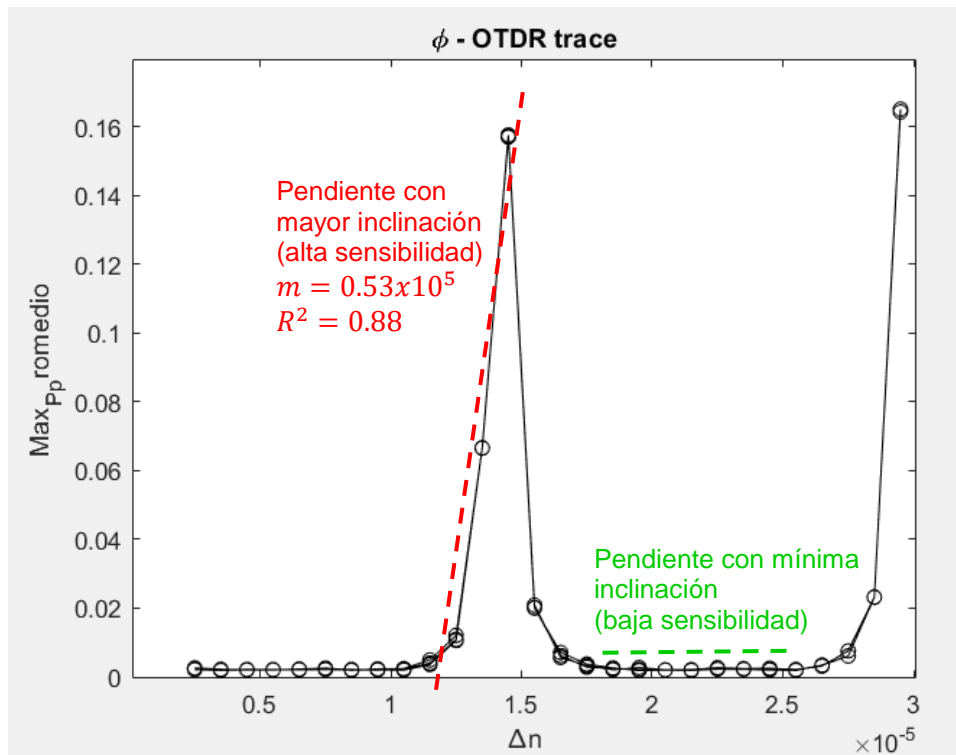


Figura 4.8. Cambios del pico de potencia de la perturbación en función de los cambios de Δn en una fibra óptica dopada con una fracción molar de GeO_2 de 15% correspondiente a un índice promedio de la fibra de $n = 1.4664$ y coeficientes de reflexión aleatorios.

De acuerdo a la Figura 4.8, se puede observar que al igual que la Figura 3.24 del Capítulo 3, se alcanzan a distinguir la formación de dos crestas en diferentes posiciones de Δn . Asimismo, se vuelven a identificar que existen zonas o rangos de Δn en donde la pendiente de la curva es máxima, indicando con ello una máxima sensibilidad para detectar

perturbaciones, y hay otras zonas o regiones de Δn en donde la pendiente de la curva es casi cero, indicando con ello una mínima sensibilidad del sistema. La gráfica de la Figura 4.8 se repitió 10 veces y se obtuvieron 10 curvas que al sobreponerse entre sí todas prácticamente coinciden en posición, verificando con ello la reproducibilidad de la simulación.

El siguiente paso es simular las perturbaciones nuevamente en la sección de fibra entre 1000m y 1002m pero ahora considerando una fibra con concentración molar de GeO_2 del 20% correspondiente a un índice promedio de la fibra de $n = 1.4737$ y también considerando perturbaciones que generen cambios de Δn entre 0.25×10^{-5} y 3×10^{-5} . Como resultado se obtienen los resultados de la Figura 4.9.

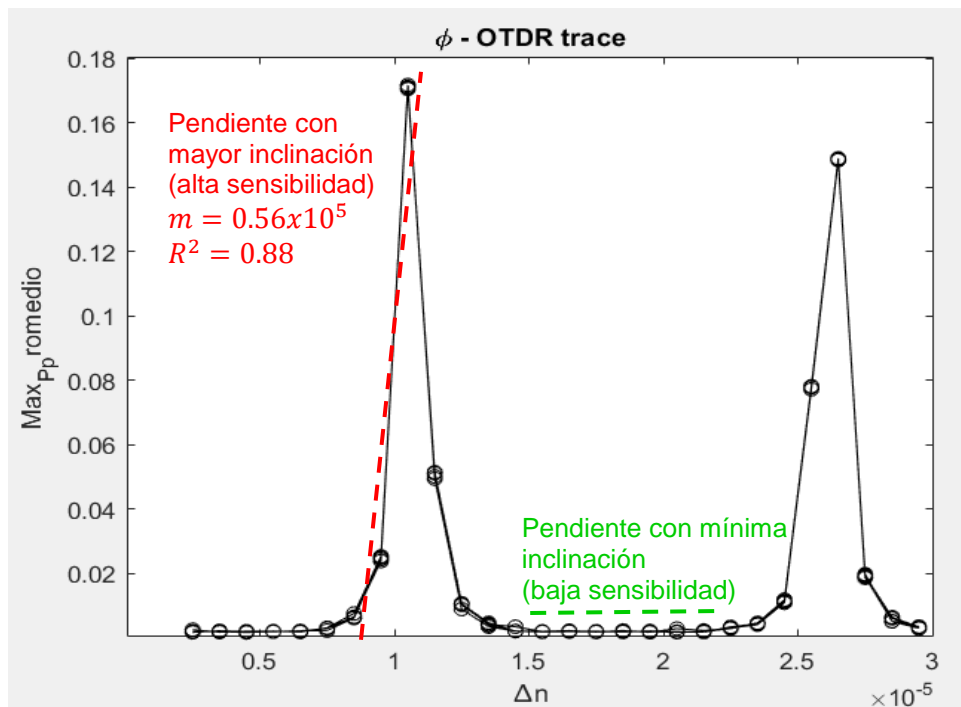


Figura 4.9. Cambios del pico de potencia de la perturbación en función de los cambios de Δn en una fibra óptica dopada con una fracción molar de GeO_2 de 20% correspondiente a un índice promedio de la fibra de $n = 1.4737$ y coeficientes de reflexión aleatorios.

Nuevamente se pueden identificar la presencia de dos crestas, sin embargo, si se compara la posición de ambas crestas observadas en las Figuras 4.8 y 4.9 estas se encuentran desplazadas, es decir, en diferente posición Δn . Esto resulta interesante debido a que en

la Figura 4.8 hay zonas o regiones de Δn en donde la sensibilidad es baja, es decir, la pendiente es casi cero, pero al variar la concentración de GeO_2 en la fibra, esta zona que antes no tenía sensibilidad por tener una pendiente mínima, ahora puede tener una alta sensibilidad debido a que la cresta se puede desplazar hacia esa zona para que haya una pendiente con mayor inclinación.

A continuación, se procede a calcular la pendiente de las rectas de color rojo mostradas en las Figuras 4.8 y 4.9 para tener una comparación cualitativa de cómo varía la sensibilidad del sistema ϕ -OTDR empleando estas dos diferentes concentraciones de GeO_2 , de 15% y 20% respectivamente. Empleando el método de mínimo cuadrados se obtiene que para el caso de una fibra dopada con una fracción molar de GeO_2 de 15% en un rango de Δn entre 1.2×10^{-5} y 1.5×10^{-5} la pendiente máxima da un valor de $m = 0.53 \times 10^5$, mientras que para el caso de una fibra dopada con una fracción molar de GeO_2 de 20% en un rango de Δn entre 0.8×10^{-5} y 1.1×10^{-5} la pendiente máxima da un valor de $m = 0.56 \times 10^5$, indicando con ello que una variación de la concentración de dopaje no modifica la sensibilidad del sistema, es decir, el valor de la pendiente no se modifica apreciablemente, pero si se observa claramente que la cresta se desplaza hacia otras regiones de Δn y dicho desplazamiento depende del nivel de concentración del dopante de GeO_2 en el núcleo de la fibra.

A continuación, se procede a realizar este mismo análisis utilizando puntos de esparcimiento ordenados uniformemente a lo largo de la fibra óptica y considerando para cada punto de esparcimiento coeficientes de reflexión dependientes del índice de refracción para ver si la forma en cómo se están simulando los puntos de esparcimiento influyen en las conclusiones obtenidas en esta sección.

4.3.2 Sensibilidad del sistema ϕ -ODTR con puntos de esparcimiento ordenados uniformemente y coeficiente de reflexión dependiente del índice de refracción.

Otra forma de variar el coeficiente de reflexión de cada punto de esparcimiento a lo largo de la fibra óptica es considerando que dichos coeficientes dependen de los diferentes índices de refracción que hay entre un punto de esparcimiento y otro. Estas diferencias de índices de refracción entre un punto de esparcimiento y otro se deben a los pequeños cambios producidos por las aglomeraciones moleculares e imperfecciones que hay a lo

largo de la fibra, haciendo que el modelo sea más realista. Dichos coeficientes se pueden calcular usando la Ecuación 3.18. En particular este ejercicio se realiza nuevamente con concentraciones molares de GeO_2 del 15% y 20% que corresponden a un índice promedio de la fibra de $n = 1.4664$ y $n = 1.4737$ respectivamente.

En la Figura 4.12 se observa una representación de los máximos de potencia óptica inducidos por la perturbación a través de Δn usando una concentración molar de GeO_2 del 15%, se observa el mismo fenómeno presentado en la Figura 4.8 cuando el coeficiente de reflexión es puramente aleatorio, en donde se vuelven apreciar dos crestas para algunos valores de Δn identificando nuevamente que existen zonas o rangos de Δn en donde la pendiente de la curva es máxima, indicando con ello una máxima sensibilidad para detectar perturbaciones, y hay otras zonas o regiones de Δn en donde la pendiente de la curva es casi cero, indicando con ello una mínima sensibilidad del sistema.

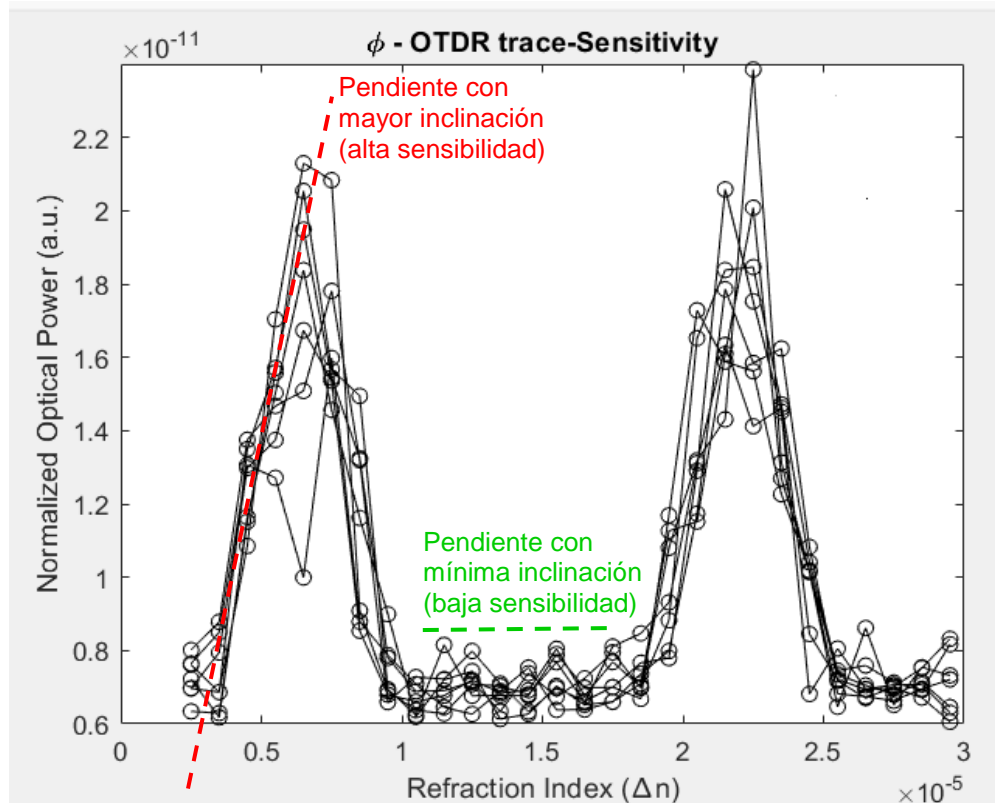


Figura 4.10. Cambios del pico de potencia de la perturbación en función de los cambios de Δn en una fibra con una fracción molar de GeO_2 de 15% correspondiente a un índice promedio de la fibra de $n = 1.4664$ y coeficientes de reflexión dependientes del índice de refracción.

El ejercicio anterior se repitió solamente 8 veces debido a que el tiempo de simulación requerido cuando se toma el coeficiente de reflexión dependiente del índice de refracción en cada posición o punto de esparcimiento es demasiado largo. Al final, las 8 curvas obtenidas se superpusieron entre sí coincidiendo prácticamente en las mismas posiciones de Δn tal como se puede apreciar en la Figura 4.10, indicando con ello una alta reproducibilidad.

Para hallar la pendiente de la recta roja mostrada en la Figura 4.10 se debe tomar un promedio de las 8 curvas sobrepuestas en la región de Δn donde hay una pendiente con máxima inclinación, es decir, en la región o valores de Δn donde se encuentra la recta roja. Este promedio se puede apreciar de una mejor manera en la Figura 4.11, en donde los círculos de color negro indican el valor promedio de los 8 puntos azules en cada posición de Δn respectivamente.

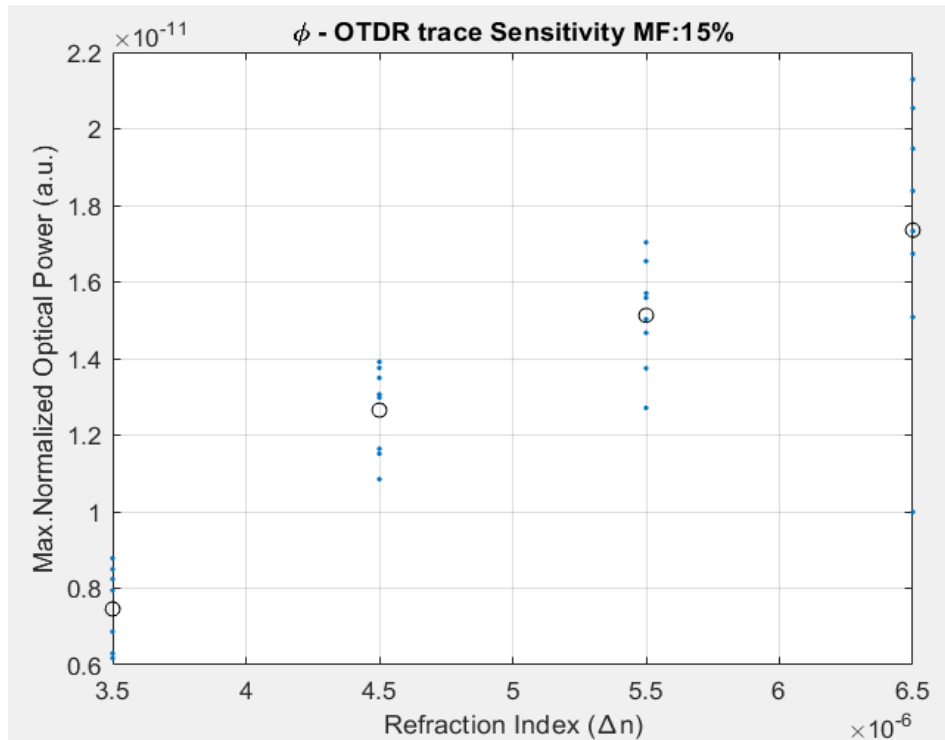


Figura 4.11. Valor promedio de las 8 curvas simuladas para una fracción molar de GeO_2 de 15% en la región de valores de Δn donde se encuentra la curva roja de la Figura 4.10.

Posteriormente, sobre la curva formada por los círculos negros de la Figura 4.11 se interpola una recta usando el método de mínimos cuadrados para calcular la pendiente con máxima inclinación, tal como se indica en la Figura 4.12

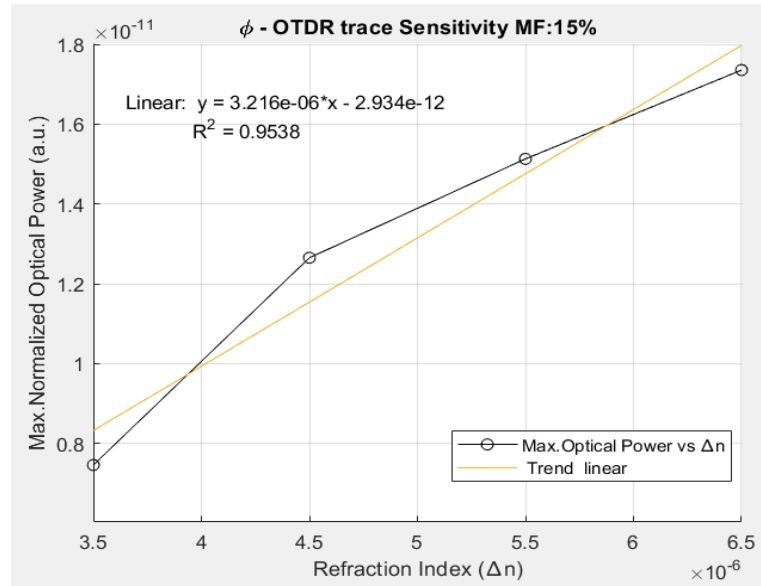


Figura 4.12. Sensibilidad del sistema ϕ -OTDR ante cambios de Δn causado por perturbaciones externas en fibras ópticas dopadas con fracción molar de GeO_2 de 15% en el núcleo de la fibra.

Ahora se repite este mismo procedimiento usando una una concentración molar de GeO_2 del 20%, tal como se observa en las Figuras 4.13, 4.14, y 4.15 respectivamente.

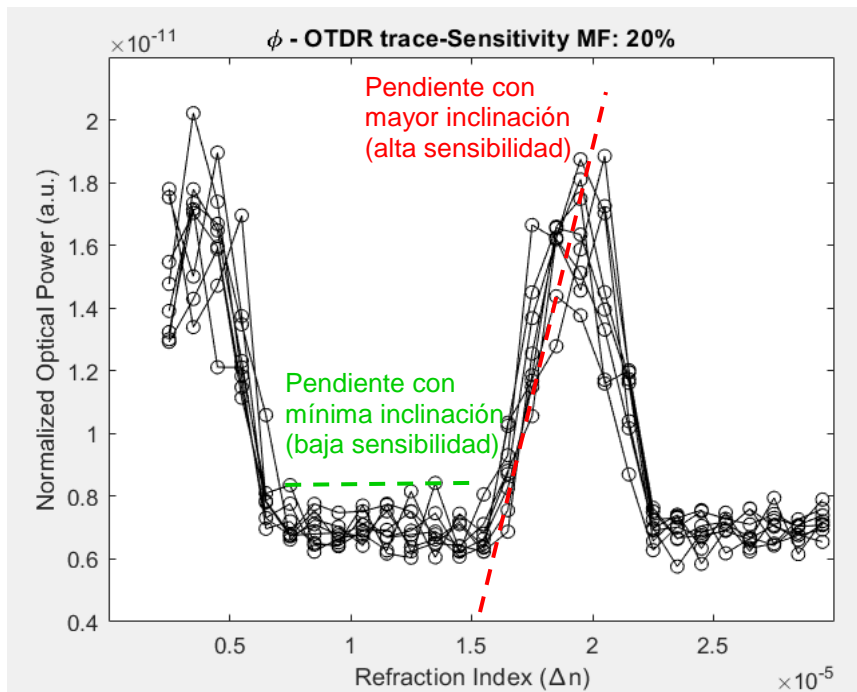


Figura 4.13. Cambios del pico de potencia de la perturbación en función de los cambios de Δn en una fibra con una fracción molar de GeO_2 de 20% correspondiente a un índice promedio de la fibra de $n = 1.4737$ y coeficientes de reflexión dependientes del índice de refracción.

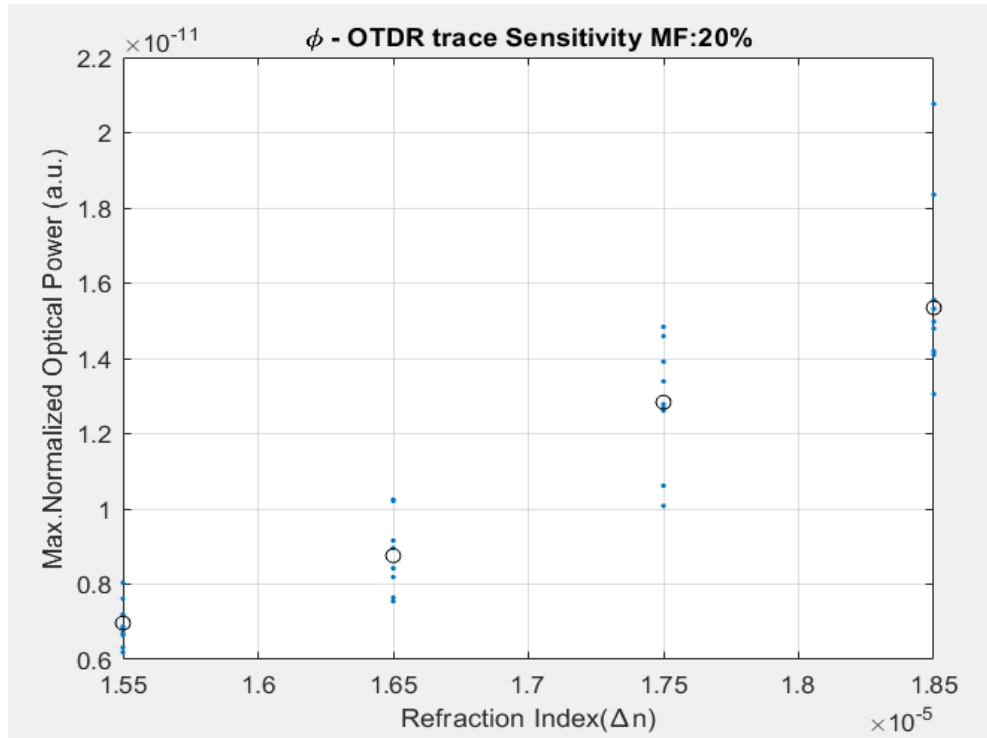


Figura 4.14. Valor promedio de las 8 curvas simuladas para una fracción molar de GeO_2 de 20% en la región de valores de Δn donde se encuentra la curva roja de la Figura 4.13.

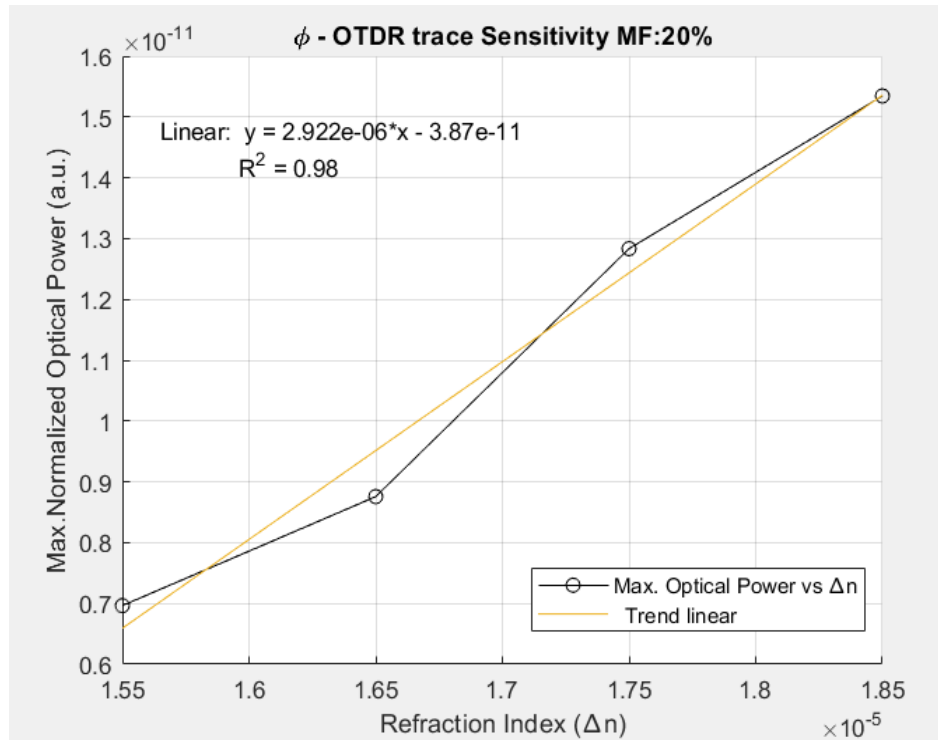


Figura 4.15. Sensibilidad del sistema ϕ -OTDR ante cambios de Δn causado por perturbaciones externas en fibras ópticas dopadas con fracción molar de GeO_2 de 20% en el núcleo de la fibra.

Comparando las pendientes de sensibilidad del sistema ϕ -OTDR indicadas en las Figuras 4.12 y 4.15 para las concentraciones de GeO_2 de 15% y 20% podemos observar que tienen valores similares indicando con ello que una variación de la concentración de dopaje no modifica notablemente la sensibilidad del sistema, es decir, el valor de la pendiente no se modifica apreciablemente, pero si se observa nuevamente que la cresta se desplaza hacia otras regiones de Δn y dicho desplazamiento depende del nivel de concentración del dopante de GeO_2 en el núcleo de la fibra. Estas conclusiones se repiten tal como se mencionó en la sección anterior para el caso de considerar coeficientes de reflexión aleatorios para cada punto de esparcimiento de la fibra óptica.

Finalmente, se considera necesario evaluar más casos de sensibilidad del sistema usando otras concentraciones de dopantes y con ello obtener más conclusiones, sin embargo esto se considera para un trabajo a futuro.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

El objetivo principal del proyecto de investigación constituye en analizar el desempeño de un sistema ϕ -OTDR, empleando fibras ópticas dopadas, y explorar opciones para incrementar la sensibilidad del sistema para detectar perturbaciones a lo largo de la fibra.

En este trabajo se desarrolló un software en MATLAB para la simulación de un sistema ϕ -OTDR permitiendo el análisis de las propiedades de luz retro-esparcida por las impurezas intrínsecas en la fibra óptica.

Se analizaron las características fundamentales de un sistema ϕ -OTDR permitiendo la comprensión de su funcionamiento y las diferencias existentes entre un OTDR y ϕ -OTDR.

Se realizó un análisis del modelo matemático de campos reflejados en un OTDR y ϕ -OTDR logrando identificar las diferencias entre las trazas ópticas obtenidas por estos dos sistemas.

Se logró simular trazas ϕ -OTDR realistas a través de la verificación de sus propiedades estadísticas, logrando la validación de ellas mediante sus distribuciones de probabilidad descritas en los histogramas de amplitud, fase y potencia óptica.

Se evaluó el comportamiento del sistema sin perturbación aplicada cuando los puntos de esparcimiento se encuentran ordenados uniformemente y aleatoriamente, y se determinó que para ambos casos las trazas conservan sus propiedades estadísticas obedeciendo sus distribuciones de probabilidad respectivas.

Se analizó como la perturbación aplicada a una fibra óptica introduce cambios en el índice de refracción mediante el efecto foto-elástico asociado a la tensión y al efecto termo-óptico causado por cambios de temperatura. Se logró observar estos cambios en la traza perturbada y se pudo determinar el punto de la fibra donde ocurrió dicha perturbación, tanto en las trazas de amplitud, de potencia, y fase óptica.

Se evaluaron las características de las trazas con perturbación aplicada cuando el coeficiente de reflexión es aleatorio y cuando dicho coeficiente es dependiente del índice de refracción.

Se analizó como el aumento de las concentraciones de GeO_2 influye en el índice de refracción del núcleo de la fibra dopada y en la sensibilidad del sistema ϕ -OTDR para detectar perturbaciones.

Se obtiene de manera general que la sensibilidad del sistema ϕ -OTDR no se modifica apreciablemente para diferentes valores de concentraciones de GeO_2 en el núcleo de la fibra, pero si se observa que hay zonas o regiones de operación del sistema ϕ -OTDR en donde la sensibilidad es baja, pero que al variar la concentración de GeO_2 en la fibra, esta zona que antes no tenía sensibilidad, ahora puede tener una alta sensibilidad.

En general, se realizó un análisis del comportamiento del ϕ -OTDR con fibras ópticas con diferentes concentraciones de dopantes logrando la caracterización de la sensibilidad del sistema para cada una de ellas.

Recomendaciones

Continuar el estudio del sistema ϕ -OTDR para lograr la implementación experimental física de este sensor distribuido.

Trabajar en el análisis de las trazas obtenidas con perturbación cuando los puntos de esparcimiento se encuentran ordenados aleatoriamente y validar los resultados.

Profundizar en el análisis de las sensibilidades de este sistema ϕ -OTDR con fibras ópticas dopadas en Erblio y fibras ópticas multinúcleo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y. K. a. K. H. M. Imahama, «“Restorability of Rayleigh backscatter traces measured by coherent OTDR with precisely frequency controlled light source”,» *IEICE Trans. Commun*, Vols. %1 de %2vol. E91, no. 4., n° no. 4, pp. pp. 1243– 1246., Mar. 2010..
- [2] Z. Wang, «“Coherent ϕ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection”,» *Opt. Express*, vol. vol. 24, n° no. 2., pp. pp. 853–858., Jan. 2016.
- [3] J. P. Graells, «“Sensores distribuidos de presencia e intrusiones”,» 2014..
- [4] N. H. H. O. Daisuke Iida, «Advances in distributed vibration sensing for optical communication fiber state visualization,» *Optical Fiber Technology*, vol. Volume 57, n° 102263, July 2020.
- [5] M. J. L. B. Escobedo, «“Optimización del Sistema ϕ -OTDR, mediante el desarrollo de una fuente de luz coherente especial y la selección de fibras ópticas sensibles”,» Chihuahua, Chih, agosto de 2017..
- [6] S. M.-L. C. D. A.-C. Hugo F. Martins, «Distributed vibration sensing over 125 km with enhanced SNR using Phi-OTDR over a URFL cavity,» *Journal of Lightwave Technology* 33, n° DOI:10.1109/JLT.2015.2396359, June 2015.
- [7] A. H. Hartog, «“Rayleigh backscattering distributed vibration sensors and static measurements,” in An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors,» FL, USA: CRC Press, 2017.
- [8] C. Z. L. L. a. S. L. W. Lin, «“Review on development and applications of fiber-optic sensors,”»,» *Symposium on Photonics and Optoelectronics*, pp. pp. 1–4., Shanghai, China, 2012.
- [9] M. B. a. E. Wolf, «Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light.,» *Cambridge University Press*, 1999..
- [10] M. I. & R. A. D. Markovic, «Determination of the reflection coefficients of laser light of wavelengths $\lambda \in (0.22 \mu\text{m}, 200 \mu\text{m})$ from the surface of aluminum using the Lorentz-Drude model.,» *Applied optics*,, pp. 3479-3483, (1990)..
- [11] S. D. Personick, «“Photon probe-An optical-fiber time-domain reflectometer”,» *Bell Syst. Tech. J.*, vol. vol. 56, n° no. 3, pp. pp. 355-366, 1977.

- [12] P. Healey, « “Statistics of Rayleigh backscatter from a singlemode fiber”,» *IEEE Transactions on Communications*, vol. vol. 35, n° no. 2, p. pp. 210–214, 1987. .
- [13] M. I. K. K. a. K. H. Y. Koyamada, «“Fiber-Optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long-range using coherent OTDR”,» *J. Lightw. Technol.* , vol. vol. 27, n° no. 9,, p. pp. 1142–114, 2009.
- [14] «UDLAP, “Coherencies y Espectro Óptico”.».
- [15] J. M. P. A. G. E. d. O. a. A. O. M. Frovel, «“Multiplexable fiber Bragg grating temperature sensors embedded in CFRP structures for cryogenic applications”,» *Proc. 3rd Eur. Conf. Struct. Health Monit.*, p. pp. 938–945, Granada, Spain, 2006.
- [16] S. M.-L. P. C. M. L. F. O. F. a. M. G.-H. H. F. Martins, «“Coherent noise 14 Journal of Sensors reduction in high visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves”,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. vol. 31, n° no. 23, p. pp. 3631–3637, 2013.
- [17] A. K. Wojcik, «“Signal statistics of phase dependent optical time domain reflectometry”,» *Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng. Comput. Sci., Texas A&M University, College Station.*, p. <http://hdl.handle.net/1969.1/4873>., TX, USA 2006..
- [18] X. L. a. P. J. Thomas, «Numerical Modeling of Φ OTDR Sensing Using a Refractive Index Perturbation Approach,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. VOL. 38, n° NO. 4, FEBRUARY 15, 2020.
- [19] M. A. S. a. L. T. X. Lu, « “Impact of the fiber coating on the temperature response of distributed optical fiber sensors at cryogenic ranges”,» *J. Lightw. Technol.*, vol. vol. 36, n° no. 4, p. pp. 961–967, Feb. 2018.
- [20] N. Y. K. N. a. H. K. M. Okaji, «“Laser interferometric dilatometer at low temperatures: Application to fused silica SRM 739”,» *Cryogenics*, Vols. %1 de %2vol. 35- vol. 12 , p. pp. 887–891, Dec. 1995.
- [21] A. M. a. T. P. Newson, «“Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling”,» *Opt. Express*, vol. vol. 25, n° no. 25, p. pp. 32021–32040, Dec. 2017.
- [22] J. J. M. C. M. B. P. Claudio Silva Z., «Regresión Lineal,» *Contibuciones Cientificas Tecnologicas. Universidad Santiago de Chile.*, vol. Vol. 47 (2022).

- [23] D. E. C. H. a. R. S.-A. Valentin GUZMAN-RAMOS, «"Numerical Analysis of GeO₂-Concentration Effects.Numerical Analysis of GeO₂-Concentration Effects under External Refractive-Index Changes",» *OPTICAL REVIEW*, vol. Vol. 21, n° No. 2, p. 143–149, 2014.
- [24] J. W. Fleming, «Material and Mode Dispersion in GeO₂·B₂O₃·SiC₂ Glasses,» *Presented at the Fall Meeting of the Glass Division, The American Ceramic Society, Pocono, Pa., October 9, 1975 (Paper No. 29-G-75F)*, Vols. %1 de %2Volume59, Issue11-12, n° Pages 503-507, November 1976.
- [25] K. G. a. A. T. a. M. v. S. b. A. B. b. O.V. Butov a, «Refractive index dispersion of doped silica for fiber optics,» *Optics Communications*, Vols. %1 de %2Volume 213, Issues 4–6, , pp. Pages 301-308, December 2002,.
- [26] H. O. e. al., «"Effect of Dopants on Transmission Loss of Low-OH-Content Optical Fiber",» *Electron*, Vols. %1 de %2vol-12, n° 509, 1976.
- [27] J. W. Fleming, «Dispersion in GeO₂ -SiO₂ glasses,» *Applied Optics*, Vols. %1 de %2Vol. 23, Issue 24, n° <https://doi.org/10.1364/AO.23.004486>, pp. pp. 4486-4493, (1984).
- [28] M. K. B. a. S. M. Jensen, « "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics," pp. 2112-2115, 1976.,» *Appl. Opt.*, vol. vol. 15, pp. no. 9 pp. 2112-2115.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometry/ Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo</i>
ϕ -OTDR	<i>Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometry/ Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo sensible a la fase</i>
NA	<i>Apertura numérica</i>
SiO ₂	<i>Dióxido de Silicio</i>
GeO ₂	<i>Dióxido de Germanio</i>
λ	<i>Longitud de Onda (nm – μm)</i>
TE	<i>Modo Transversal Eléctrico</i>
TM	<i>Modo Transversal Magnético</i>
Δd	<i>Resolución de la traza</i>
Δz	<i>Resolución espacial</i>
f_r	<i>Frecuencia de repetición</i>
$\Delta n(z)$	<i>Variación del índice de refracción</i>
τ_c	<i>Tiempo de coherencia</i>
l_c	<i>Longitud de coherencia</i>
ω_0	<i>Frecuencia temporal</i>
$E(z)$	<i>Amplitud o intensidad del campo eléctrico.</i>
α	<i>Coeficiente de atenuación</i>
n_{ave}	<i>Índice de refracción promedio de la fibra</i>
r_m	<i>Coeficiente de reflexión</i>
$randn$	<i>Distribución de probabilidad gaussiana entre 0 y 1</i>
η	<i>Coeficiente de expansión térmica</i>
γ	<i>Coeficiente Termo-óptico</i>

APÉNDICE 1

Algoritmo en Matlab® para obtener una Traza ϕ -OTDR sin perturbación

```

clc
clear all
format long

%
%Parametros generales a utilizar en el OTDR de fase
l=1550e-9; %longitud de onda de la luz (m)
b=0;
alfa=4.6e-5; %factor de perdida de luz en la fibra (1/m)
n1=1.46; %indice de refraccion del núcleo de la fibra
n2=1.45; %indice de refraccion del revestimiento de la fibra
n=1.456; %indice de refracción efectivo de la fibra  $n_2 < n < n_1$ 
C=3e8; %velocidad de la luz en el vacío (m/s)
v=C/n; %velocidad de la luz en la fibra (m/s)
l=1550e-9; %longitud de onda de la luz (m)
f=C/l; %frecuencia temporal de la luz (1/s)
k=2*pi*n/l; %frecuencia espacial angular (rad/m)
w=2*pi*f; %frecuencia temporal angular (rad/s)

%
%Definiendo el eje x de la traza

L=3000; %longitud de la fibra optica (m)
tf=2*L/v; %tiempo de ida y vuelta del pulso a lo largo de la fibra (s)
S=1e9; %tasa de muestro del fotodetector (muestras por segundo)
dt=1/S; %resolucion en tiempo (s)
dz=dt*v/2; %resolución en distancia (m)
t=0:dt:tf; %vector de tiempo
d=0:dz:L; %vector de distancia

%
%Definiendo el pulso

T=10e-9; %ancho temporal (s)
WP=v*T; %ancho espacial (m)
E0=1; %amplitud inicial del campo (Unidades Arbitrarias)

%
%Distribucion de la posicion de puntos de esparcimiento en la fibra

dens=10; %puntos de esparcimiento por metro
M=dens*L; %puntos de esparcimiento total

%posicion con distribucion uniforme (m)
pos_u=L/M:L/M:L;

%posicion con distribución aleatoria (m)

```

```

pos_a=L*rand(1,M);
pos_a=sort(pos_a);

%definiendo que distribucion escoger
pos=pos_a;

%
%Reflexion r y fase ph del campo reflejado en cada punto de esparcimiento

%reflexion aleatoria para cada punto (adimensional)
r=(4e-2)*rand(1,M);
%r=(4e-2)*ones(1,M);

%indice de refracción aleatorio para cada punto (adimensional)
n_random=n+0.01*rand(1,M);

%fase aleatoria para cada punto de esparcimiento (rad)
ph=(2*pi*n_random/l).*pos;
%ph=0*(2*pi*n/l).*pos;

%
%Obteniendo la potencia reflejada del pulso en cada posicion de la fibra

for i=1:length(t)
suma=0;
posmin=(t(i)*v)/2; %inicio espacial del pulso
posmax=(t(i)*v+WP)/2; %fin espacial del pulso
if posmin==L
break
end
majorposmin=find(pos>posmin);
minorposmax=find(pos<posmax);
for k=majorposmin(1):minorposmax(end)
suma=suma+r(k)*E0*exp(-0.5*alfa*pos(k))*exp(j*ph(k));
end
z(i)=(t(i)*v+WP/2)/2; %posicion de la fibra ubicado en el centro del pulso
E(i)=suma; %campo reflejado
P(i)=abs(E(i))^2; %potencia reflejada
end

%
%GRAFICA 1

%Graficando la traza en amplitud
E_prom=mean(abs(E));
figure(1)
plot(z,abs(E)/E_prom,'-b')
xlabel('Fiber Position (m)')
ylabel('Normalized Optical Amplitude (a.u.)')
title('\phi - OTDR trace')
axis([0 L 0 max(abs(E)/E_prom)])
hold on

```

```

figure(2)
hist(abs(E)/E_prom,50)
xlabel('Normalized Optical Amplitude (a.u.)')
ylabel('Number of Points')
title('Histogram for E')
hold on

%funcion de distribucion de probabilidad de Rayleigh
histo_E=hist(abs(E)/E_prom,50);
x=0:0.1:4;
alpha=mean(x)/sqrt(pi);
Rayleigh=(2*x/(alpha^2)).*exp(-(x.^2)/(alpha^2));
Rayleigh_Norm=Rayleigh*max(histo_E)/max(Rayleigh);
figure(2)
plot(x,Rayleigh_Norm,'-r','linewidth',2.5)
axis([0 4 0 2000])

```

```

%
%GRAFICA 2

```

```

%Graficando la traza en fase
figure(3)
plot(z,angle(E),'-b')
xlabel('Fiber Position (m)')
ylabel('Optical Phase (rad)')
title('\phi - OTDR trace')
axis([0 L -2*pi 2*pi])
hold on

```

```

figure(4)
hist(angle(E),50)
xlabel('Optical Phase (rad)')
ylabel('Number of Points')
title('Histogram for E')
hold on

```

```

%
%GRAFICA 3

```

```

%Graficando la traza en potencia
P_prom=mean(P);
figure(5)
plot(z,P/P_prom,'-b')
xlabel('Fiber Position (m)')
ylabel('Normalized Optical Power (a.u.)')
title('\phi - OTDR trace')
axis([0 L 0 max(P/P_prom)])
hold on

```

```

figure(6)
hist(P/P_prom,50)

```



```

xlabel('Normalized Optical Power (a.u.)')
ylabel('Number of Points')
title('Histogram for P')
hold on

%funcion de decaimiento exponencial
histo_P=hist(P/P_prom,50);
x=0:0.1:7;
Exponential=exp(-x);
Exponential_Norm=Exponential*max(histo_P);
figure(6)
plot(x, Exponential_Norm, '-r', 'linewidth', 2.5)
axis([0 7 0 6000])

```

APÉNDICE 2

Algoritmo en Matlab® para obtener una Traza ϕ -OTDR con perturbación

```

clear ;
close all;
clc;
format long
%
%Parametros generales a utilizar en el OTDR de fase
l=1550e-9; %longitud de onda de la luz (m)
lam=1.550;
VarNConcetracMolar=[];
%MF=[0.10:0.05:0.25];
MF=0.20;
%Molar fraction GeO2
b=0;
for b=1:length(MF);
SA=[0.69616630, 0.40794260, 0.89747940];
SI=[0.68404300e-1, 0.11624140, 0.98961610e1]; %Coeficientes de sellmeier
GA=[0.80686642, 0.71815848, 0.854116831];
GI=[0.68972606e-1, 0.15396605, 0.11841931e2];
sum=0;
for i=1:3
    sumando = (SA(i)+ MF(b))*(GA(i)-SA(i))*lam^2/(lam^2-(SI(i)+MF(b))*(GI(i)-SI(i)))^2);
    sum=sumando+sum;
end
n=sqrt(sum+1)
VarNConcetracMolar(i)=n
end
%for i=1:length(VarNConcetracMolar);
alfa=4.6e-5; %factor de perdida de luz en la fibra (1/m)
n1=1.46; %indice de refraccion del núcleo de la fibra
n2=1.45; %indice de refraccion del revestimiento de la fibra
%n=1.47; %indice de refracción efectivo de la fibra n2<n<n1
C=3e8; %velocidad de la luz en el vacío (m/s)

```

```

v=C/n;    %velocidad de la luz en la fibra (m/s)
f=C/l;    %frecuencia temporal de la luz (1/s)
k=2*pi*n/l; %frecuencia espacial angular (rad/m)
w=2*pi*f; %frecuencia temporal angular (rad/s)
naverage=VarNConcetracMolar(i);
%
%Definiendo el eje x de la traza
L=3000;  %longitud de la fibra optica (m)
tf=2*L/v; %tiempo de ida y vuelta del pulso a lo largo de la fibra (s)
S=1e9;   %tasa de muestro del fotodetector (muestras por segundo)
dt=1/S;  %resolucion en tiempo (s)
dz=dt*v/2; %resolución en distancia (m)
t=0:dt:tf; %vector de tiempo
d=0:dz:L; %vector de distancia
%
%Definiendo el pulso
T=10e-9; %ancho temporal (s)
WP=v*T;  %ancho espacial (m)
E0=1;    %amplitud inicial del campo (Unidades Arbitrarias)
%
%Distribucion de la posicion de puntos de esparcimiento en la fibra
dens=10; %puntos de esparcimiento por metro
M=dens*L; %puntos de esparcimiento total
%posicion con distribucion uniforme (m)
pos_u=L/M:L/M:L;
%posicion con distribución aleatoria (m)
pos_a=L*rand(1,M);
pos_a=sort(pos_a);
%definiendo que distribucion escoger
pos=pos_u;
deltaN=[2.5e-6:1e-6:30e-6];
total=[];
Max_P_Vector=length(deltaN);
for inter=1:10
for a=1:length(deltaN)
%INICIO DEL CICLO PARA REPETIR EL MODELADO DE LA TRAZA
NUM=200; %numero de trazas a promediar
for tr=1:NUM
%
%Reflexion r y fase ph del campo reflejado en cada punto de esparcimiento
%indice de refracción aleatorio para cada punto (adimensional)
n_random=n+0.0000026*randn(1,M);

%n_random=naverage+0.0000026*randn(1,length(pos)+1);
%reflexion aleatoria para cada punto (adimensional)
r=(4e-2)*rand(1,M);

%r=zeros;
%for i=1:length(pos) %reflection coefficient at position zi
% r(i)=(n_random(i)-n_random(i+1))/(n_random(i)+n_random(i+1));
%end
%n_random(end)=[];

```

```

%fase aleatoria para cada punto de esparcimiento (rad)
ph=(2*pi*n_random/l).*pos;

%
%Obteniendo la potencia reflejada del pulso en cada posicion de la fibra
%TRAZA SIN PERTURBAR

for i=1:length(t)
suma=0;
posmin=(t(i)*v)/2; %inicio espacial del pulso
posmax=(t(i)*v+WP)/2; %fin espacial del pulso
if posmin==L
break
end
majorposmin=find(pos>posmin);
minorposmax=find(pos<posmax);
for k=majorposmin(1):minorposmax(end)
suma=suma+r(k)*E0*exp(-0.5*alfa*pos(k))*exp(j*ph(k));
end
z(i)=(t(i)*v+WP/2)/2; %posicion de la fibra ubicado en el centro del pulso
E(tr,i)=suma; %campo reflejado
P(tr,i)=abs(E(tr,i))^2; %potencia reflejada
end

%
%Reflexion r y fase ph del campo reflejado en cada punto de esparcimiento
%reflexion aleatoria para cada punto (adimensional)
%r=(4e-2)*rand(1,M);
n_random=naverage+0.0000026*randn(1,M);
%n_random=naverage+0.0000026*randn(1,length(pos)+1);

%reflexion aleatoria para cada punto (adimensional)
r=(4e-2)*rand(1,M);
%r=zeros;
%for i=1:length(pos) %reflection coefficient at position zi
% r(i)=(n_random(i)-n_random(i+1))/(n_random(i)+n_random(i+1));
%end
%n_random(end)=[];

%fase aleatoria para cada punto de esparcimiento (rad)
ph=(2*pi*n_random/l).*pos;

%Se aplica una perturbación constante entre L=1000m y L=1002m
posicion1=find(pos>=1000,1);
posicion2=find(pos>=1002,1);

%reflexion en la zona perturbada (adimensional)
r(posicion1:posicion2)=0.04;
%indice de refracción en la zona perturbada (adimensional)
%n_random(posicion1:posicion2)=n+0.00000933891;
n_random(posicion1:posicion2)=naverage+deltaN(a);
%fase en la zona perturbada (rad)

```

```

ph(posicion1:posicion2)=(2*pi*n_random(posicion1:posicion2)/l).*pos(posicion1:posicion2)
;
%
%Obteniendo la potencia reflejada del pulso en cada posicion de la fibra
%TRAZA PERTURBADA
for i=1:length(t)
suma=0;
posmin=(t(i)*v)/2; %inicio espacial del pulso
posmax=(t(i)*v+WP)/2; %fin espacial del pulso
if posmin==L
break
end
majorposmin=find(pos>posmin);
minorposmax=find(pos<posmax);
for k=majorposmin(1):minorposmax(end)
suma=suma+r(k)*E0*exp(-0.5*alfa*pos(k))*exp(j*ph(k));
end
E_perturbado(tr,i)=suma;
P_perturbado(tr,i)=abs(E_perturbado(tr,i))^2;

E_dif(tr,i)=E_perturbado(tr,i)-E(tr,i);
P_dif(tr,i)=P_perturbado(tr,i)-P(tr,i);
end

%
%FINAL DEL CICLO PARA REPETIR EL MODELADO DE LA TRAZA
tr
end
E_promedio_amplitud=mean(abs(E_dif));
E_promedio_fase=mean(angle(E_dif));
P_promedio=mean(P_dif);
Max_P_promedio=max(P_promedio);
Max_P_Vector(a)=Max_P_promedio;
total(inter,a)=Max_P_promedio;

%GRAFICA 1
%Graficando la traza en amplitud

figure(1)
plot(z,E_promedio_amplitud,'.-b')
xlabel('Fiber Position (m)')
ylabel('Normalized Optical Amplitude (a.u.)')
title('\phi - OTDR trace')
hold on

%
%GRAFICA 2

%Graficando la traza en fase
figure(2)
plot(z,E_promedio_fase,'.-b')

```

```

xlabel('Fiber Position (m)')
ylabel('Optical Phase (rad)')
title('\phi - OTDR trace')
axis([0 L -2*pi 2*pi])
hold on

%
%GRAFICA 3

%Graficando la traza en potencia
figure(3)
plot(z,P_promedio,'.-b')
xlabel('Fiber Position (m)')
ylabel('Normalized Optical Power (a.u.)')
title('\phi - OTDR trace')
hold on

figure(4)
plot(deltaN(a),Max_P_Vector(a),'.-b')
xlabel('\Delta n')
ylabel('Max_P_promedio')
title('\phi - OTDR trace Pto a Pto ')
hold on
end

figure(5)
plot(deltaN,total(inter,:), 'k-o')
xlabel('\Delta n')
ylabel('Max_P_promedio')
title('\phi - OTDR trace')
hold on

end

```

APÉNDICE 3

Algoritmo en Matlab® para realizar regresión lineal por mínimos cuadrados

```

clc;
clear all;
x=[];
y=[];
plot(x,y, '*');
grid on;
hold on;
xlabel('\Delta n')
ylabel('Max.Normalized Optical Power (a.u.)')
title('\phi - OTDR trace Sensitivity MF:')
%n cantidad de elementos en vector x
n=36;

```

```
sumaxi_yi=sum(x.*y);
sumaxi=sum(x);
sumax_cuadrado=sum(x.^2);
cuadrado_sumx=(sumaxi)^2;
sumyi=sum(y);
a1=((n*sumaxi_yi)-(sumaxi*sumyi))/((n*sumax_cuadrado)-cuadrado_sumx)
yttesteada=mean(y);
xttesteada=mean(x);
a0=yttesteada-a1*xttesteada
linea_ajuste=a0+a1*x;
%_
%GRAFICA 1
plot(x,linea_ajuste,'-');
```
