

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**SIMULACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS DE
ESTRUCTURAS PETROLERAS POR MEDIO DE
SENSADO ACÚSTICO DISTRIBUIDO CON FIBRA
ÓPTICA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de las Telecomunicaciones

AUTOR:

Alvaro Burga Larco

ASESOR:

Manuel Augusto Yarlequé Medina

Lima, diciembre, 2022

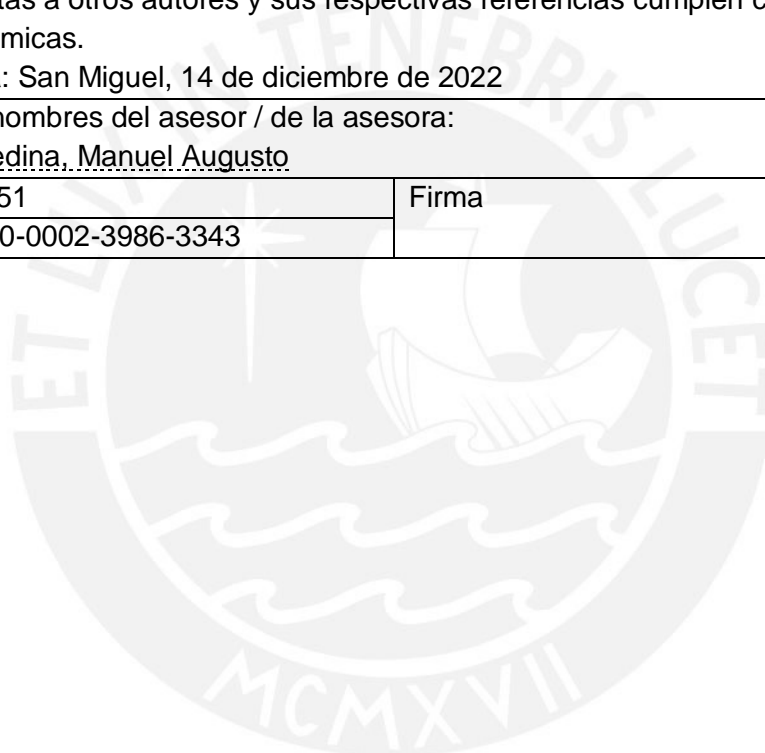
Declaración jurada de autenticidad

Yo, Manuel Augusto Yarlequé Medina, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado “ Simulación para la detección de fallas de estructuras petroleras por medio desensado acústico distribuido con fibra óptica”del autor Alvaro Burga Larco dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 8%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 14/12/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y confirmo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio alguno.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Miguel, 14 de diciembre de 2022

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Yarleque Medina, Manuel Augusto	
DNI:32990451	Firma
ORCID: 0000-0002-3986-3343	



Resumen

Es bien sabido que un derrame de petróleo en el ecosistema marino puede tener efectos catastróficos para la fauna y los humanos cercanos a este ecosistema. Adicionalmente, un derrame genera bastantes pérdidas a una empresa, por la reducción de la sustancia obtenida y los pagos de reparación del daño ambiental. Por otra parte, el sensado acústico distribuido (DAS) es una tecnología que se utiliza fibra óptica para detectar vibraciones y la frecuencia de estas a lo largo de la fibra. Estos sensores de fibra óptica tienen la ventaja de proveer una menor atenuación y una mayor resistencia frente a las interferencias electromagnéticas. Es por ello por lo que el propósito de esta tesis es diseñar un modelo analítico de DAS que pueda detectar fallas en una estructura petrolera y simular todos los fundamentos físicos relacionados a este fenómeno. Para ello se utilizó un láser con un ancho de haz de 0.4fm y un pulso de luz de 10ns de duración para poder detectar una onda de presión de 6.3Pa a través de una fibra de 1km de longitud con una potencia equivalente del ruido en el receptor igual a 1.3nW . La simulación propuesta fue desarrollada en Matlab y permite detectar vibraciones a frecuencias de hasta 37.8kHz y a distancias de hasta 1.3km con una resolución espacial de 1m .

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi Madre, Miriam Larco, la persona que más me ha apoyado en toda la etapa universitaria y la que me ha marcado como persona.

También se la dedico a mi hermano, Gonzalo Burga, mi eterno compañero de vida que siempre estuvo presente para motivarme en los tiempos más complicados.

Gracias a ustedes dos he llegado a estos logros y por ello quiero dedicarles este trabajo a ustedes.



Agradecimientos

En el transcurso de esta etapa universitaria tuve la oportunidad de conocer a muchas personas que me ayudaron bastante en este proceso,

Muchas gracias a Víctor Soriano por todo el apoyo en el transcurso de la tesis. Fue gracias a ti que pude conocer a profundidad el tema de mi tesis y los consejos brindados han sido esenciales para el desarrollo de mi tesis.

Muchas gracias al profesor César Santivañez por la motivación a la investigación y al gusto de leer textos académicos.

Muchas gracias al profesor Hugo Rosas por contagiarme el gusto de las comunicaciones ópticas.

Muchas gracias al profesor David Chávez por todo el apoyo metodológico para el desarrollo de la tesis.

Muchas gracias a mis profesores Jaume Comellas y Gabriel Junyent de España que me ayudaron a conseguir la información esencial de mi tesis.

Muchas gracias a mis amigos Marcelo García y Sergio Muro por todo el apoyo moral durante toda la etapa universitaria.

Pero especialmente muchas gracias a mi asesor, Manuel Yarlequé, que desde un principio confió en mi para esta investigación y estuvo constantemente apoyándome, no solo para tener un buen trabajo de tesis, sino para ser un profesional excepcional. Este trabajo es solo el primero de muchos en mi carrera académica y estoy muy agradecido por su tiempo dedicado en hacer de mi un mejor investigador.

Índice

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD	I
RESUMEN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	3
1.1. Área temática en telecomunicaciones	3
1.2. Motivación personal	3
1.3. Problemática.....	4
1.3.1. Impacto ambiental	4
1.3.2. Impacto Social.....	12
1.3.3. Impacto Económico	14
1.4. Hipótesis	16
1.5. Objetivo	16
CAPITULO 2	18
2.1. Marco teórico.....	18
2.1.1. Fundamentos de la Luz.....	18
Modelo electromagnético.....	18
Modelo de partículas.....	19
Coherencia de la luz	20
2.1.2. Fibra óptica.....	23
2.1.3. Atenuaciones de la fibra óptica.....	25
Absorción.....	25
Scattering.....	27
2.1.4. Reflectometría	27
Arquitectura del OTDR.....	30

Resolución espacial	31
Efecto del ruido en el OTDR.....	32
2.1.5. Deformación y ondas de presión.....	33
Ondas de presión.....	33
Deformación	34
2.1.6. Sensado acústico distribuido con fibra óptica	35
Introducción	35
Fundamentos:.....	36
Identificación de frecuencias de ondas mecánicas	40
2.2. Estado del arte.....	42
 CAPITULO 3	 52
3.1. Sistema propuesto.....	52
3.1.1. Selección del Láser	54
3.1.2. Selección del generador de pulsos.....	56
3.1.3. Selección de la fibra óptica	59
3.1.4 Selección del circulador óptico	60
3.1.5 Selección del amplificador.....	61
3.1.6. Selección del fotorreceptor	62
3.2. Diseño de la simulación	63
3.2.1. Definición de constantes	64
3.2.2. Formación de los scattering centers	65
3.2.3. Coeficiente de reflexión de los scattering centers	67
3.2.4. Generación de la firma de interferencia	68
3.2.5. Generación de la vibración.....	70
3.2.6. Patrón con vibración	72
3.2.7. Detección del evento	75
3.2.8. Detectar frecuencia.....	76
 CAPÍTULO 4	 79
4.1 Evaluación del diseño.....	79
4.1.1. Longitud máxima de evaluación de la fibra.....	79
4.1.2. Amplitud y frecuencia mínima a la que se detecta el evento	81
4.1.3. Frecuencia máxima detectada.....	83
4.1.4. Frecuencia mínima detectada	83
4.2. Análisis económico:	84
4.2.1. Costo de equipos:.....	84
4.2.2. Costo de operación y mantenimiento	84
4.3. Aportes de la tesis	85
4.3.1. Aportes en el ámbito ambiental.....	85
4.3.2. Aportes los ámbitos: social, salud y bienestar	85
4.3.3. Aportes en el ámbito económico y global.....	85
4.3.4. Aportes en el ámbito cultural.....	86

CONCLUSIONES	87
BIBLIOGRAFÍA.....	89



Índice de figuras

FIGURA 1.1. DERRAME DE PETRÓLEO DE 1979 EN EL GOLFO DE MÉXICO	5
FIGURA 1.2. PROMEDIO DE DERRAMES DE PETRÓLEO POR DÉCADA.....	6
FIGURA 1.3. AMENAZAS PARA LA BIODIVERSIDAD ANIMAL.....	7
FIGURA 1.4. AVE RECUBIERTA TOTALMENTE EN PETRÓLEO	8
FIGURA 1.5. DELFÍN AFECTADO POR EL DERRAME DE PETRÓLEO	9
FIGURA 1.6 EFECTOS DEL AUMENTO DE LA ACIDEZ DEL MAR.....	12
FIGURA 1.7 PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR DERRAME EN EL GOLFO DE MÉXICO EN BILLONES DE DÓLARES.	16
FIGURA 2.1. ESTRUCTURA DE LA FIBRA ÓPTICA	23
FIGURA 2.2. MODOS DE TRASMISIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA.....	24
FIGURA 2.3. GRÁFICA DE ATENUACIONES EN LA FIBRA ÓPTICA.....	26
FIGURA 2.4. ARQUITECTURA DEL OTDR	30
FIGURA 2.5. DEFORMACIÓN APLICADA POR UNA FUERZA	34
FIGURA 2.6. DEFORMACIÓN POR TRACCIÓN O COMPRESIÓN	35
FIGURA 2.7. PATRÓN DE INTERFERENCIA DE UN ϕ -OTDR	37
FIGURA 2.8. VARIABLES TEMPORALES EN UN PATRÓN DE ϕ -OTDR	42
FIGURA 2.9. SISTEMA DE DETECCIÓN CON REJILLA DE BRAGG E INTERFERÓMETRO DE MICHELSON	44
FIGURA 2.10. DETECCIÓN DE VIBRACIONES GENERADAS EN DISTINTOS RODILLOS INDUSTRIALES	48
FIGURA 3.1. SISTEMA DAS PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN TUBERÍAS PETROLERAS	53

FIGURA 3.2. EXTERNAL CAVITY LASER	55
FIGURA 3.3. MODULADOR MACH ZENDER.....	58
FIGURA 3.4: DISTRIBUCIÓN SIMULADA DE LOS SCATTERING CENTERS.....	65
FIGURA 3.5: POSICIÓN DEL SCATTERING CENTER EN UNA POSICIÓN CON X, Y VARIABLES ALEATORIAS UNIFORMES	66
FIGURA 3.6 DISTRIBUCIÓN DE LOS SCATTERING CENTERS EN UNA LONGITUD DE 50MM.....	66
FIGURA 3.7: SECCIONES LONGITUDINALES DE LA FIBRA	69
FIGURA 3.8: FIRMA DE INTERFERENCIA DE LA FIBRA	70
FIGURA 3.9: DIFERENCIA DE PATRONES CON Y SIN VIBRACIÓN	74
FIGURA 3.10: DETECCIÓN DEL EVENTO	76
FIGURA 3.11: VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DEL BACK SCATTERING CON RESPECTO AL TIEMPO EN EL EVENTO	77
FIGURA 3.12: TRANSFORMADA DE FOURIER DE LA VARIACIÓN DE INTENSIDAD RESPECTO DEL TIEMPO DEL EVENTO.....	78

Índice de tablas

TABLA 2.1. VARIABLES DE LA POTENCIA DE BACKSCATTERING.....	21
TABLA 2.2. VARIABLES DE LA DISTANCIA DE COHERENCIA	22
TABLA 2.3. VARIABLES DE LA POTENCIA DE BACKSCATTERING.....	28
TABLA 2.4. VARIABLES DE LA ENERGÍA DEL PULSO	29
TABLA 2.5. VARIABLES EN LA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS	30
TABLA 2.6. VARIABLES EN LA DETECCIÓN DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL.....	32
TABLA 2.7. POSICIÓN DE LOS SCATTERING CENTERS	38
TABLA 2.8. CAMPO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	39
TABLA 3.1. PARÁMETROS DEL LÁSER SFL1550S.....	55
TABLA 3.2. PARÁMETROS DEL MODULADOR MACH ZENDER LN81S-FC.....	58
TABLA 3.3. PARÁMETROS DEL MODULADOR MACH ZENDER SFL1550S.....	59
TABLA 3.4. PARÁMETROS DE LA FIBRA CORNING SMF-28E+	60
TABLA 3.5. PARÁMETROS DEL CIRCULADOR ÓPTICO 6015-3	61
TABLA 3.6 PARÁMETROS DEL EDFA.....	62
TABLA 3.7 PARÁMETROS DEL FOTORRECEPTOR AVALANCHA	63
TABLA 3.8: CONSTANTES UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN	64
TABLA 3.9: PARÁMETROS DEL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DE LOS SCATTERING CENTERS	67
TABLA 3.10: PARÁMETROS DE LA VIBRACIÓN.....	71
TABLA 3.11: PARÁMETROS TEMPORALES	72

TABLA 3.12: PARÁMETROS DE DEFORMACIÓN 72

TABLA 3.13: PARÁMETROS PARA GENERAR EL PATRÓN CON VIBRACIÓN 74

TABLA 4.1: COSTE DE EQUIPOS 84



Introducción

Mientras más avanza la tecnología, mejores son los mecanismos que se usan para poder transmitir y sensar la información que se necesita para una determinada aplicación. Una tecnología muy importante que se aplica bastante en el área de comunicaciones es la fibra óptica que debido a sus características puede transmitir información con muchas menos pérdidas y mucha menos interferencia que los cables eléctricos que se utilizaban anteriormente. Además, esta tecnología ha evolucionado de tal manera que ahora es capaz de censar e identificar variaciones de su entorno, tales como la temperatura y la presión, se forma distribuida, característica novedosa frente a los sensores mecánicos y eléctricos convencionales.

De igual manera, se sabe que anteriormente el ser humano ha sido muy descuidado con los temas ecológicos y actualmente es importante conservar el equilibrio natural del mundo para evitar que se presenten efectos dañinos a los seres vivos a largo plazo. Una de las mayores problemáticas percibidas es la contaminación marina la cual afecta un gran número de seres vivos que habitan esas aguas e indirectamente también nos afecta como seres humanos al consumir animales marinos o al vivir cerca de las zonas contaminadas. Una de las principales causas de esta contaminación es la fuga de petróleo que se da al momento de la extracción. Como se sabe, un porcentaje del petróleo se encuentra en el subsuelo marino, por ende, en caso de una falla en la extracción del petróleo, la fuga de la sustancia termina contaminando el mar.

Por tanto, es importante tener un sistema de sensado que sea capaz de detectar los puntos de falla a lo largo del sistema de extracción de petróleo en el mar con el fin de prever estos efectos utilizando tecnologías novedosas en el área de telecomunicaciones.

A partir de ello y aplicando el método científico, esta tesis propone el desarrollo y la simulación de un sistema de sensado distribuido por fibra óptica que detecta las vibraciones que inducen las fallas en las tuberías de extracción de petróleo con el fin de evitar una fuga en el fondo marino. La fibra óptica utilizada corresponde a las fibras clásicas utilizadas en telecomunicaciones por tanto permite darle distintos usos a este componente en el rubro de las telecomunicaciones.

El presente documento está dividido en 4 capítulos. En el primer capítulo se desarrolla el contexto problemático y los objetivos de la investigación. En el segundo capítulo se detalla el marco teórico donde se explicarán los conceptos de la fibra óptica, coherencia de la luz, la reflectometría en el dominio del tiempo, la detección acústica distribuida y el estado del arte. En el tercer capítulo se desarrolla la propuesta del sistema y el desarrollo de la simulación. En el cuarto capítulo se analiza el sistema en conjunto con sus limitaciones y sus beneficios. Adicionalmente al final del documento se apreciarán las principales conclusiones y logros de esta tesis dentro de las cuales se destaca el efectivo sistema de sensado de fibra óptica hasta una frecuencia de 37.8 kHz según la simulación realizada.

CAPITULO 1

Marco Problemático

1.1. Área temática en telecomunicaciones

Este trabajo representa la continuación del trabajo de investigación denominado “Análisis comparativo de los sensores fibra óptica Raman y Bragg para el internet de las cosas” [1]. Se invita a lector revisar el área temática en la fuente indicada pues esta corresponde con la presente tesis.

1.2. Motivación personal

En primer lugar, este tema me pareció muy interesante debido a que el DAS con fibra óptica es una tecnología relativamente novedosa cuyo uso va en aumento. Por tanto, el dominio de esta temática me permitirá ser una de las pocas personas que conocen los fundamentos de la tecnología, lo cual me convertiría en un profesional con añadido distinto.

En segundo lugar, esta tecnología trabaja con la física moderna, en la cual se ven temas de cuántica relacionados a la fotónica. Estos temas permiten entender el funcionamiento

de muchos fenómenos naturales que no se pueden explicar con la mecánica clásica. Por ende, hay una mayor motivación por el deseo de aprender.

Por último, esta aplicación ayuda a reducir el impacto ambiental al reducir la probabilidad de fuga de petróleo tras una falla en la estructura de extracción. Como actualmente los temas ambientales, tales como el calentamiento global, son críticos para la supervivencia mundial, el desarrollo de esta tesis permite aportar a solucionar esta problemática.

1.3. Problemática

1.3.1. Impacto ambiental

Como se desarrolló anteriormente, desde la revolución industrial el ser humano ha hecho uso de los recursos del mundo sin tener conciencia en el impacto y daño que le puede hacer al planeta y a todos los seres vivos que se encuentran en este. Una de las mayores causas de la contaminación ambiental es el derrame de petróleo en los océanos tal como se observa en la figura 1.1 que muestra el derrame de 1979 en el golfo de México [1].



Figura 1.1. Derrame de petróleo de 1979 en el golfo de México

Fuente [1]

A pesar que los derrames de petróleo se han ido reduciendo en el tiempo, aún en promedio hay aproximadamente 2 derrames de petróleo por año tal como se observa en la figura 1.2 que no son despreciables y afectan en gran medida el ecosistema [2].

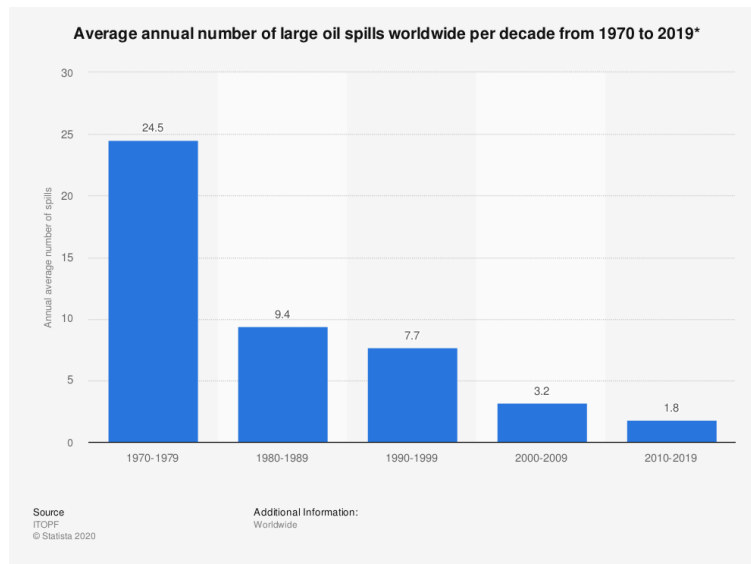


Figura 1.2. Promedio de derrames de petróleo por década

Fuente [2]

El petróleo es un hidrocarburo muy concentrado que actualmente, debido a su composición química, se utiliza para obtener energía para beneficio del ser humano, tal como en la industria automotriz, en fábricas, etc. Sin embargo, esta sustancia es tóxica para los seres vivos y la interacción con este, sea ingerirlo, respirar sus gases o tener contacto directo con él, genera daños muy fuertes que en muchos casos son irreversibles. De acuerdo a una encuesta realizada por la comisión europea el 2015 [3] la mayor amenaza para la biodiversidad animal son los desastres causados por los humanos, tal como el derrame de petróleo, como se observa en la figura 1.3. De igual manera se puede apreciar que la contaminación en la tierra, agua y aire son factores que afectan bastante a la biodiversidad, en los cuales una de las principales causas de esto es por las fugas de petróleo como se explicará más adelante.

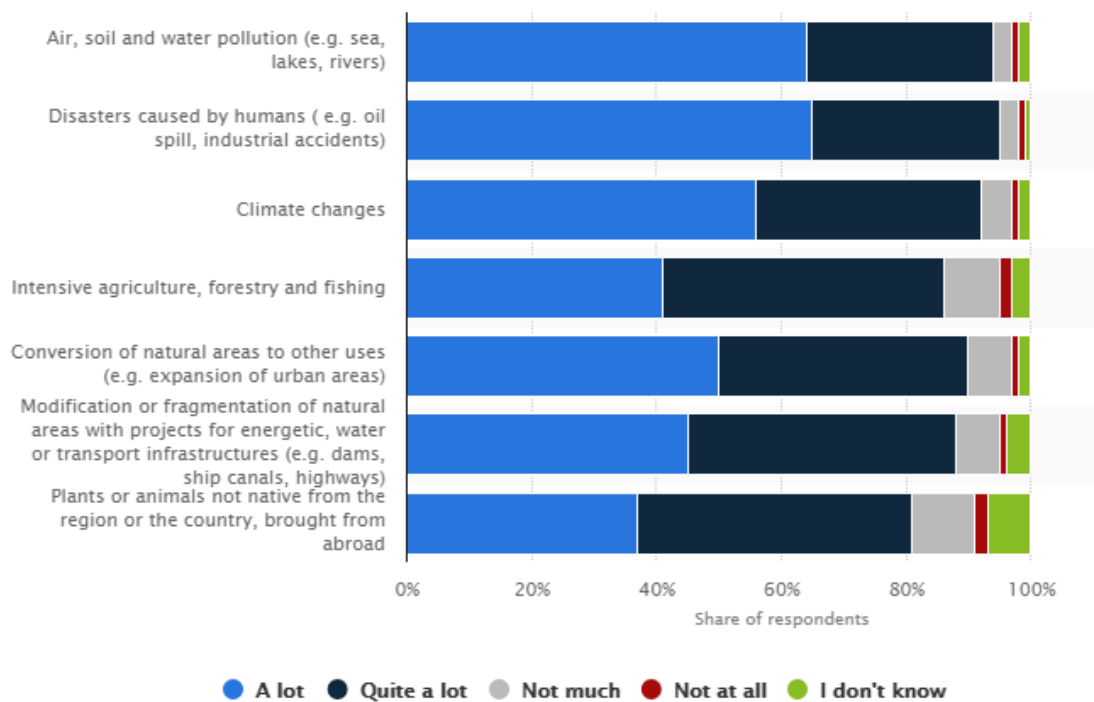


Figura 1.3. Amenazas para la biodiversidad animal

Fuente [3]

Por tanto, cuando el petróleo termina en el mar, este interactúa con la fauna y la flora que vive en él. La simple interacción física con esta sustancia genera que los animales pierdan propiedades de protección de su piel, tal como las aves con sus plumas, lo cual en muchos casos termina en enfermedades mortales como hipotermia [4]. Además, un animal recubierto en petróleo presentara dificultades en la movilidad debido a la viscosidad de este como se puede observar en la figura 1.4. Esto genera que en muchos casos los animales no puedan volar, en caso de las aves, o nadar, en caso de los peces, lo cual implicaría una muerte segura al no poder adquirir sus alimentos [5].



Figura 1.4. Ave recubierta totalmente en petróleo

Fuente [5]

Además, los animales ingieren esta sustancia que se encuentra presente en su ecosistema y en su alimento terminando envenenados por la toxicidad presente en la presencia de metales pesados del petróleo. Muchos de estos animales terminan muriendo al no poder soportar los químicos presentes en el petróleo cuando acceden a su organismo. Así mismo, muchos de los huevos son destruidos debido a la presencia de los hidrocarburos presentes en el petróleo y los que no terminan con deformaciones y mutaciones que de igual manera recortan el tiempo de vida del animal [5].

El petróleo además cuenta con VOC (Componentes orgánicos volátiles por sus siglas en inglés) los cuales emiten gases sumamente dañinos y cancerígenos para los seres vivos [4]. Por ende, mamíferos marinos, como los delfines y las ballenas, y otros animales marinos como las tortugas marinas se ven directamente afectados por esta problemática. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 1.5 en la cual se muestra uno de los 17 delfines que perdieron su vida tras un derrame en el mar [6]. Este hidrocarburo emitía

gases que resultaban totalmente tóxicos para los delfines resultando que muchos de estos murieran en el proceso.



Figura 1.5. Delfín afectado por el derrame de petróleo

Fuente [6]

De igual manera el petróleo en crudo tiene distintos tipos de elementos los cuales afectan de forma distinta el ambiente.

En primer lugar, el petróleo, al tener una densidad promedio de 870 kg/m^3 que es menor que la del agua que es aproximadamente 1000 kg/m^3 , genera una capa negra en la superficie del mar. Esta capa de petróleo absorbe un gran porcentaje de la radiación solar que incide en el océano, lo cual evita que los rayos del sol ingresen al interior de este. Esto genera un efecto negativo en las especies marinas que dependen de la luz o radiación solar para vivir. Por ejemplo, las algas y otras plantas marinas no pueden realizar la fotosíntesis a falta de la radiación solar y algunos animales necesitan de la luz para poder ubicarse y alimentarse, por lo que se reducen sus probabilidades de supervivencia. Esto afecta directamente a la cadena alimenticia, ya que como muchos de los animales se alimentan de estas plantas, terminan muriendo a falta de alimento, o terminan intoxicados al consumir el petróleo presente en las especies más cercanas a la superficie. Al reducirse

las especies que se alimentan de las plantas, de igual manera se reduce el alimento de las especies que se alimentan de esos peces. Por ende, la biodiversidad se ve seriamente afectado por la reducción de las especies.

Además, esto también afecta directamente a la temperatura y la radiación promedio de la tierra. Cuando los rayos del sol ingresan, gran parte de la radiación es reflejada por los glaciares y por la superficie del mar. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, tras un derrame se genera una capa de petróleo en la superficie, la cual absorbe en gran medida los rayos del sol incidentes. Por tanto, la radiación se mantiene en el planeta, la cual aumenta la temperatura promedio de este. Además, ese aumento de temperatura es suficiente para acabar con gran cantidad de las especies que no llegan a adaptar a vivir con un clima cálido [7].

En segundo lugar, un buen porcentaje de su composición, como se mencionó anteriormente con el VOC, es volátil. Por tanto, se evapora con facilidad generando gases que a largo plazo terminan en la atmósfera. Estos gases, con alto contenido de carbono, producen el conocido efecto invernadero, el cual retiene el calor generado por los rayos incididos del sol que escapan del planeta por la reflexión en las superficies más reflectivas del planeta, como son los glaciares y los océanos [7].

Un aumento considerable de estos gases aumenta en gran medida de la temperatura del planeta promoviendo el aumento del calentamiento global, en el cual como se mencionó anteriormente afecta directamente a la biodiversidad del planeta puesto que muchas especies no se pueden llegar a adaptar a los cambios de temperatura producidos por este efecto. De igual manera este aumento de temperatura derrite los glaciares de los polos, lo que produce una reducción del campo magnético terrestre y en consecuencia aumenta la radiación de rayos ultravioleta que inciden al planeta por parte del sol [5] [7].

Por último, cierto porcentaje del petróleo contiene elementos solubles en el agua marina. Este es uno de los efectos más perjudiciales para la vida debido a que estos elementos se quedan presentes en el mar por muchos años antes que su concentración sea despreciable [4].

Como se mencionó anteriormente, esto afecta en principal medida a la fauna y flora marina. Los metales pesados presentes son tóxicos para todas estas especies. De igual manera esta solución aumenta la concentración de PH en la zona afectada, la cual afecta directamente en la supervivencia de muchas de las especies. Un aumento considerable en el PH del océano puede devastar por completo la zona afectada puesto que es un cambio total del medio [8]. Todas las especies que no se llegan a adaptar a este cambio terminaran pereciendo y las que se adapten pueden tener mutaciones que resulten en malformaciones que debiliten la especie de la zona afectada. Lo explicado anteriormente se puede apreciar en la figura 1.6 donde se observa que el aumento del PH afecta completamente la vida marina, tanto en la salud de la fauna como en las especies que se encuentran en la zona afectada.

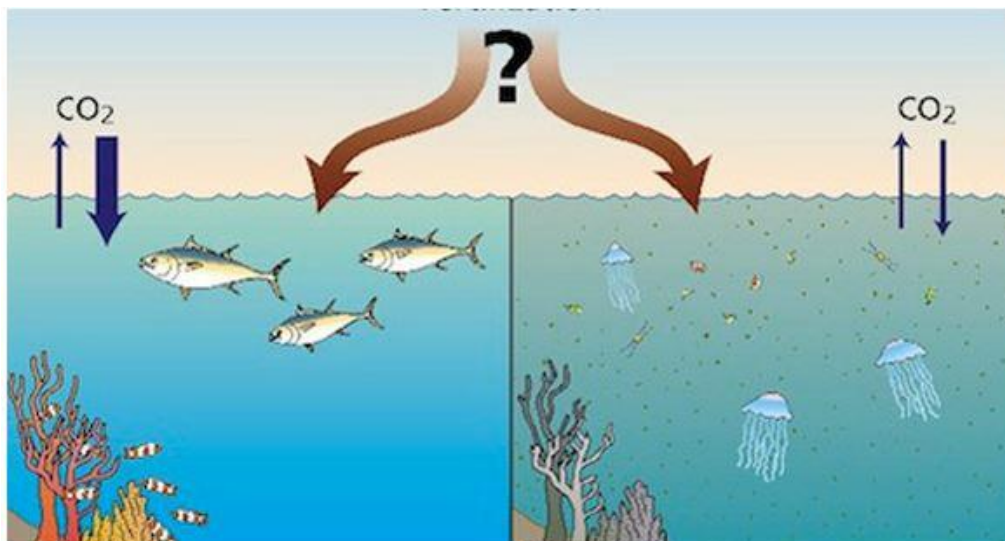


Figura 1.6 Efectos del aumento de la acidez del mar

Fuente [8]

En resumen, es sumamente importante evitar a toda costa el derrame de petróleo con un sistema que detecte las fallas antes que estas sucedan ya que en caso suceda el derrame se tendrá un efecto directo en el ambiente, tanto en la vida animal que se encuentra en la zona del incidente, como en el incremento del calentamiento global.

1.3.2. Impacto Social

Al igual que el impacto que se genera con los animales afectados por un derrame de petróleo, los seres humanos, al ser de igual forma un ser vivo, se ve directamente afectado. Según estadísticas de la ONU del 2017, cerca del 10% de la población mundial (más de 600 millones de personas) vive cerca de los océanos [9]. Este grupo de personas, en su mayoría, se alimenta de los recursos marinos (peces, algas, mariscos, etc.) e interactúan constantemente con el océano, ya sea bañándose o navegando.

Sin embargo, tras una fuga de petróleo, como se explicó anteriormente, todo el ecosistema se ve afectado, incluyendo a los humanos que viven cerca a este desastre. El principal

impacto es la salud de las personas causado por los efectos del petróleo, los cuales se describen a continuación.

En primer lugar, como el petróleo es una sustancia en su mayoría viscosa, las personas que se bañen en el mar pueden llegar a interactuar directamente con el petróleo [10]. Debido a sus componentes químicos y sus hidrocarburos concentrados, la exposición de la piel con el petróleo causa en la mayoría de casos irritación y a largo plazo, dependiendo de su composición, puede llegar a ser cancerígeno [11]. Además, esta sustancia es altamente viscosa y al ser una sustancia apolar, no es soluble en agua. Por ende, esta sustancia se puede quedar impregnada en la piel por horas, lo cual incrementa sus efectos anteriormente mencionados. Además, los objetos utilizados para la pesca, sean botes o redes, también se impregnan de petróleo, lo cual transportan el petróleo a las costas y a los animales pescados respectivamente [10].

En segundo lugar, los gases volátiles presentes en el petróleo (VOC), como se explicó anteriormente, son altamente cancerígenos para las personas. La marea y las corrientes de viento empujan estos gases a los pueblos cercanos al yacimiento, afectando la salud de toda la población. Estos gases, aparte de ser cancerígenos para el pulmón a largo plazo, producen dolor de cabeza, fatiga, irritación en los ojos y otros problemas para la salud de las personas [4][10].

En tercer lugar, como se vio anteriormente, cierto porcentaje del petróleo se disuelve en el mar. Por tanto, los peces absorben parte del contenido de esta sustancia. Un gran porcentaje de los seres humanos se alimenta de estos peces (en especial los que viven en las zonas costeras cercanas al incidente). Por ende, cuando estos peces son consumidos por las personas, estas son afectadas. Primero, se consumen los elementos dañinos del petróleo, lo que puede causar serias enfermedades estomacales y otras enfermedades al no poder procesar estas sustancias. Segundo, estos elementos afectan por completo el

sabor y el aroma del pescado, lo cual afecta directamente a los negocios lo cual pierden reputación de sus productos. De igual manera, si se sabe que en una zona ha habido un derrame, la reputación de los negocios de la zona se ve afectada debido al miedo de las personas de consumir el producto contaminado [10].

Por último, un efecto muy importante, el cual no está relacionado con la salud, es la pérdida del petróleo que podría haber sido utilizado para otras aplicaciones. Como es sabido, muchas aplicaciones de la actualidad usan el petróleo como fuente de energía, tales como los autos, los barcos, las motocicletas, etc. Por tanto, una pérdida del petróleo en una fuga reduce la cantidad de petróleo obtenida, lo que implica un menor aprovechamiento de este recurso en las aplicaciones a favor de la humanidad anteriormente descritas.

1.3.3. Impacto Económico

Otra problemática importante se da en las pérdidas económicas. Las cuales, implican la fuga del petróleo producida en la etapa de extracción de una empresa petrolera. A continuación, se describen los distintos impactos,

En primer lugar, y como menor impacto, tras una fuga se reduce la eficiencia de la recolección de la sustancia. En otras palabras, se pierde un gran porcentaje del petróleo total del yacimiento que escapa al mar y ya no puede ser recuperado. Esto se traduce en una reducción del elemento extraído lo que implica menos materia para vender. El resultado final implica una pérdida de dinero en la empresa de extracción del petróleo debido a la reducción del producto a vender [12].

En segundo lugar, la empresa tiene que encargarse de limpiar todo el derrame que provoco. Para ello, necesitara pagar a una tercera empresa encargada de ello. Puesto que

el proceso de limpieza puede tomar varios meses, la empresa tendrá que asumir todo el costo correspondiente.

En tercer lugar, la empresa tiene que pagar una compensación periódicamente para reparar todos los daños provocados por ese derrame. Esto es especialmente para las personas directamente afectadas, tales como los pobladores cercanos al lugar de yacimiento, que como se mencionó anteriormente, muchos de los animales que vivían en la zona del derrame acabarían muriendo y por ello se tendrá una reducción de alimento. Por ello, este dinero de compensación se encargará de subsanar a las personas directamente afectadas por este derrame.

Por último, se tiene que realizar un pago de penalidad a las autoridades de la zona por todos los daños ocurridos. Similar a la compensación, este pago es para compensar las pérdidas de petróleo producidas en la fuga que corresponden al gobierno de la zona. Este pago implica un castigo por parte de las autoridades por todas las consecuencias que traen consigo el derrame [13].

En la figura 1.7 se aprecia todos los gastos implicados en el derrame de petróleo del golfo de México, el cual fue uno de los más grandes. Como se puede apreciar, un derrame de petróleo puede llegar a costar 25 billones de dólares en limpieza y penalidades, más 5 billones anuales por la compensación de la zona afectada. Por ende, se busca reducir en toda medida toda probabilidad de falla en el proceso de extracción de petróleo y para ello se utilizará sensores de fibra óptica.

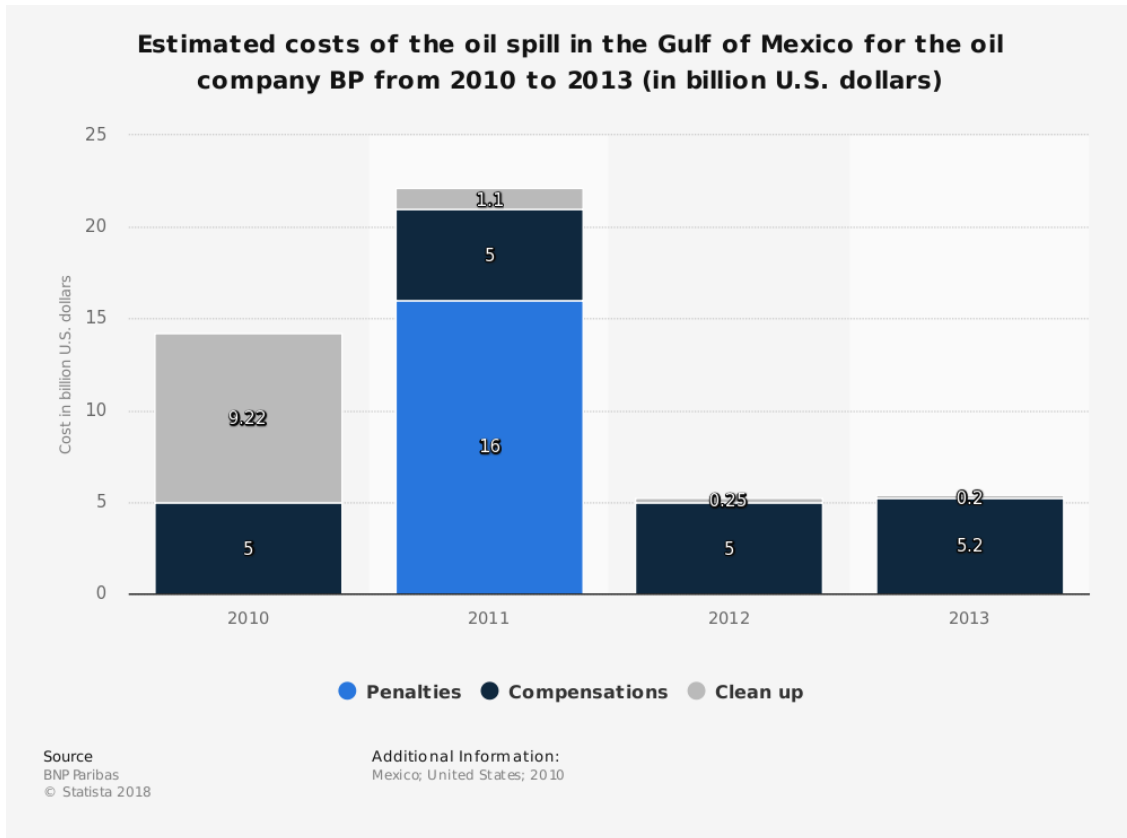


Figura 1.7 Pérdidas económicas por derrame en el golfo de México en billones de dólares.

Fuente [13]

1.4. Hipótesis

Mediante la simulación de un sistema de sensado acústico con fibra óptica se podrá detectar las vibraciones mecánicas que fuesen producidas por una falla en una tubería de extracción de petróleo

1.5. Objetivo

El objetivo general de la tesis es desarrollar y simular un sistema de sensado acústico distribuido por fibra óptica que sea capaz de detectar la ubicación y la frecuencia de vibraciones que inducen una falla en una estructura petrolera

Los objetivos específicos para desarrollar el general se explican a continuación:

1. Diseñar un sistema de sensado acústico distribuido con fibra óptica que pueda ser aplicado para el monitoreo de fallas en estructuras petroleras
2. Simular el sistema por medio de un programa de Matlab que sea capaz de generar las vibraciones e identificar la ubicación y la frecuencia del evento a lo largo de la fibra





CAPITULO 2

Estado del arte y tecnologías involucradas en el sensado

2.1. Marco teórico

2.1.1. Fundamentos de la Luz

Modelo electromagnético

En una primera instancia se puede definir la luz como una onda electromagnética, es decir una combinación entre campos eléctricos y magnéticos los cuales son producidos por una carga en movimiento. Por las ecuaciones de Maxwell se sabe que una variación de campo magnético genera un campo eléctrico y de igual manera una variación de campo eléctrico genera un campo magnético. A partir de estos efectos se produce una propagación de energía (onda) en la cual no hay materia involucrada. Por ello se puede observar que la luz se puede propagar en el vacío [14].

Cabe resaltar que una onda electromagnética en el vacío viaja a una velocidad constante (la velocidad de la luz). De igual manera, al igual que las ondas mecánicas, estas tienen una frecuencia, que indica el tiempo necesario para recorrer un periodo, y una longitud de onda, la cual indica la distancia entre dos puntos que tienen la misma fase en la onda electromagnética. A partir de esto se han asignado distintas ondas electromagnéticas a distintas aplicaciones según su frecuencia o longitud de onda. A esta clasificación de ondas electromagnéticas se le denomina el espectro electromagnético. En este caso la luz visible se encuentra en el rango aproximado de 380nm a 780nm de longitud de onda. Sin embargo, debido a las atenuaciones que se encuentran en la fibra óptica en este rango del espectro se usa un rango entre 800nm y 1700nm.

En el estudio, es muy importante considerar el efecto de onda electromagnética debido a que la luz se va a propagar de esta manera. De igual forma se pueden predecir comportamientos cuando la onda interactúa con otros medios con distintas propiedades electromagnéticas. Específicamente, con el índice de refracción del medio. Se sabe que cuando una onda electromagnética incide a otro medio con un índice de refracción diferente, un porcentaje de la onda se va a transmitir al segundo medio y otro porcentaje se va a reflejar, manteniéndose en el primer medio. Se pueden calcular estos porcentajes de acuerdo a los índices de refracción y por tanto manipular la transmisión de la luz tal como se explicará posteriormente [14].

Modelo de partículas

De igual manera la luz se puede modelar como una partícula llamada fotón, la cual cuenta con una porción discreta de la energía de la onda electromagnética. Por tanto, según el físico Max Planck la energía viaja en paquetes los cuales son proporcionales a la frecuencia. De esta manera se pueden explicar fenómenos de la luz a niveles cuánticos cuando interactúa con materia, por tanto, es importante considerarlo.

En conclusión, la luz se puede modelar tanto como una onda electromagnética cuando se propaga en la fibra y como una partícula cuando interactúa con una materia con las propiedades ya vistas anteriormente [14].

Coherencia de la luz

La coherencia de la luz es un fenómeno que se presenta en la realidad debido a que un pulso de luz presenta distintos componentes frecuenciales los cuales a medida que se desplazan, se desfasan de manera distinta. En un principio, cuando se emite el pulso, un láser emite el pulso de luz con los distintos componentes frecuenciales en fase, sin embargo, a medida que va pasando el tiempo, las distintas componentes frecuenciales se desfasan entre sí [15].

Así, la coherencia de la luz se define como el tiempo de estabilidad en donde un pulso de luz mantiene aproximadamente constante su fase en las distintas componentes frecuenciales que está posee [15]. Esta característica también describe la estabilidad del pulso ya que solo es posible tener patrones de interferencia con luz coherente [16] debido a que cada componente frecuencial se interfiere de forma independiente y en caso las componentes no se encuentren correlacionadas, el patrón de interferencia no se podrá apreciar debido a que se superponen todas las interferencias y por ende solo se puede llegar a apreciar el promedio.

Por tanto, como se explicó anteriormente, una luz es coherente cuando se tiene una correlación entre las fases de un campo eléctrico. Por ende, según [16], teniendo un campo eléctrico centrado en la frecuencia ω_0 con un cambio de fase con un cambio de fase $\varphi(t)$ entre las demás componentes frecuenciales, entonces la función de autocorrelación normalizada se puede calcular aplicando la ecuación 2.1.

$$g(\tau) = \frac{R_{E(t)}(\tau)}{R_{E(t)}(0)} = e^{j\omega_0\tau} R_{e^{j\varphi(t)}}(\tau) \quad (2.1)$$

Cuyos parámetros se observan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Variables de la potencia de backscattering

Fuente [16]

Variables	Significado	Unidades
$R_x(\tau)$	Función de autocorrelación de x	adimensional
ω_0	Frecuencia central del campo eléctrico	Rad/s
$\varphi(t)$	Desfase entre las componentes frecuenciales	Rad

Como se puede apreciar en la ecuación 2.1, $|R_{e^{j\varphi(t)}}(\tau)|$ se encuentra en el intervalo de 0 y 1, en el cual para un tiempo $\tau = 0$, la autocorrelación es máxima, resultando en $|g(\tau)| = 1$. Pero a medida que va pasando el tiempo, el parámetro $|R_{e^{j\varphi(t)}}(\tau)|$ se va reduciendo hasta llegar al tiempo $\tau = \tau_c$ donde el valor tiende a cero [16]. Por tanto, a τ_c se le conoce como el tiempo que recorre la onda electromagnética hasta que pierda su coherencia. Matemáticamente este tiempo se puede calcular aplicando la ecuación 2.2.

$$\tau_c = \int_{-\infty}^{\infty} |g(\tau)|^2 d\tau \quad (2.2)$$

En general, τ_c es inversamente proporcional al ancho de banda óptico del pulso de luz [15]. En general para un pulso gaussiano con ancho de banda óptico de $\Delta\omega$, según [16], se puede calcular este tiempo aplicando la ecuación 2.3.

$$\tau_c = \frac{\sqrt{8\pi \ln 2}}{\Delta\omega} \quad (2.3)$$

De igual forma, teniendo el tiempo de coherencia τ_c , se puede calcular la distancia de coherencia l_c , es decir la distancia máxima en donde se puede asumir que la luz es coherente. La distancia de coherencia se puede obtener a partir de la ecuación 2.4 [15]:

$$l_c = V_g \tau_c \quad (2.4)$$

Cuyos parámetros se aprecian en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Variables de la distancia de coherencia

Fuente [15]

Variables	Significado	Unidades
V_g	Velocidad de grupo en la fibra	m/s
τ_c	Tiempo de coherencia en la fibra	s

2.1.2. Fibra óptica

La fibra óptica es un medio guiado por donde se transmite la luz que transmite la información de un punto a otro. Esta se compone de tres partes como se puede apreciar en la figura 2.1.

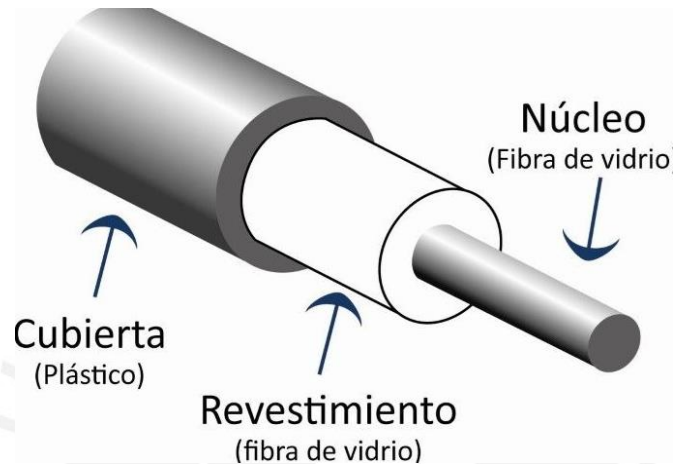


Figura 2.1. Estructura de la fibra óptica

Fuente [17]

En primer lugar, se encuentra el núcleo, el cual es donde principalmente se propaga la luz. De acuerdo con el tamaño de este, la luz se puede transmitir de diferentes maneras, los cuales se denominan modos de transmisión. A medida que más grande sea el núcleo, más modos se van a transmitir. A este tipo de fibra que transporta más de un modo de transmisión se le denomina multimodo. Sin embargo, distintos modos implican que toman distintos caminos y por ende unos recorren más espacio que otros. Como la velocidad de la luz en un mismo medio es constante (en este caso el medio sería el núcleo de la fibra óptica), entonces se genera una dispersión temporal que limita la velocidad de la fibra. Por tanto, lo mejor es tener un núcleo pequeño, de tal manera que solo permite un modo de propagación y así evitar la dispersión modal. A este tipo de fibra se les llama

monomodo y actualmente son las más utilizadas ya que permiten llegar a velocidades y distancias más largas. La figura 2.2 muestra gráficamente como se representa la propagación de modos en la fibra descritos anteriormente.

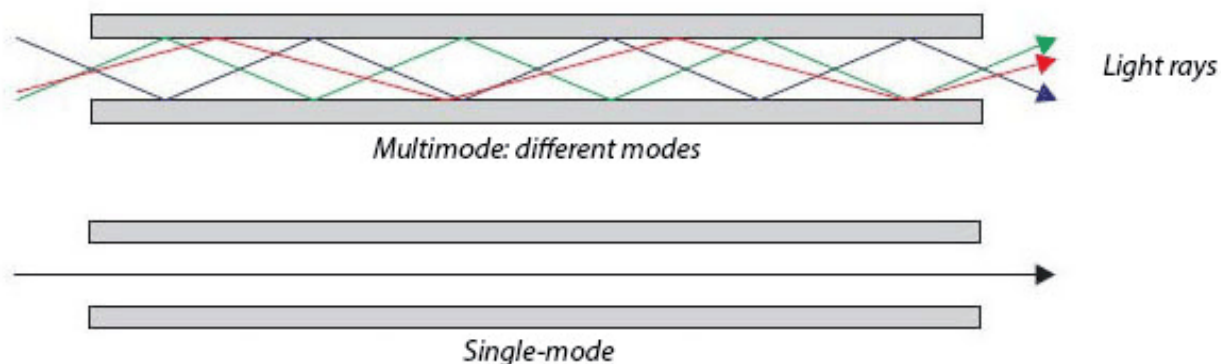


Figura 2.2. Modos de transmisión en la fibra óptica

Fuente [18]

En segundo lugar, está el cladding o revestimiento, el cual envuelve el núcleo de la fibra y es el elemento que permite la transmisión de la luz a través de la fibra óptica. El cladding tiene un índice de refracción ligeramente inferior al del núcleo. Esto se consigue dopando tanto el núcleo como al cladding con elementos químicos. Como se explicó anteriormente, si una onda electromagnética incide de un medio con un índice de refracción a otro con un índice distinto, entonces parte de la onda se va a transmitir y parte se va a reflejar. Sin embargo, para ciertos ángulos de incidencia, la onda no se transmite en el segundo medio, sino que toda la onda se ve reflejada en el primer medio. A este principio se le denomina la reflexión total interna. Al tener los índices del revestimiento y el núcleo diferentes, se incide la luz de tal manera que ocurra este fenómeno y se propague la luz sin tener pérdidas por refracción. Sin embargo, es importante aclarar que de igual manera existe un porcentaje de la energía que se propaga en el cladding, por

tanto, se define el MFD (*mode field diameter*) como el radio en donde se encuentra acumulado el 90% de la energía de la luz, sin importar los radios del núcleo ni del cladding [17].

Por último, se tiene la cubierta de la fibra o carcasa, que principalmente se usa para proteger la fibra del deterioro y darle robustez y tracción al cable de fibra. De acuerdo con la aplicación de la fibra óptica la carcasa va a cambiar. Por ejemplo, para los interiores de las instalaciones conviene utilizar cables flexibles con alta resistencia a las curvaturas, mientras que para un cable que se encuentra en el exterior necesita mucha más protección de tal manera que resista las condiciones climáticas tales como la lluvia o la nieve y otros peligros como la mordedura de los roedores [17].

2.1.3. Atenuaciones de la fibra óptica

Como se desarrolló anteriormente, la fibra óptica es el medio por donde se propaga la luz. Sin embargo, como en todo medio, la energía que viaja por la fibra se ve atenuada por distintos tales como la absorción y el scattering los cuales se detallan a continuación.

Absorción

La absorción hace que la energía de la luz que viaja en la fibra se transmita en forma de calor en el material. La absorción puede ser intrínseca (si es puramente por la interacción con el material) o extrínseca (si es causada por elementos externos al material al momento de la fabricación) [19].

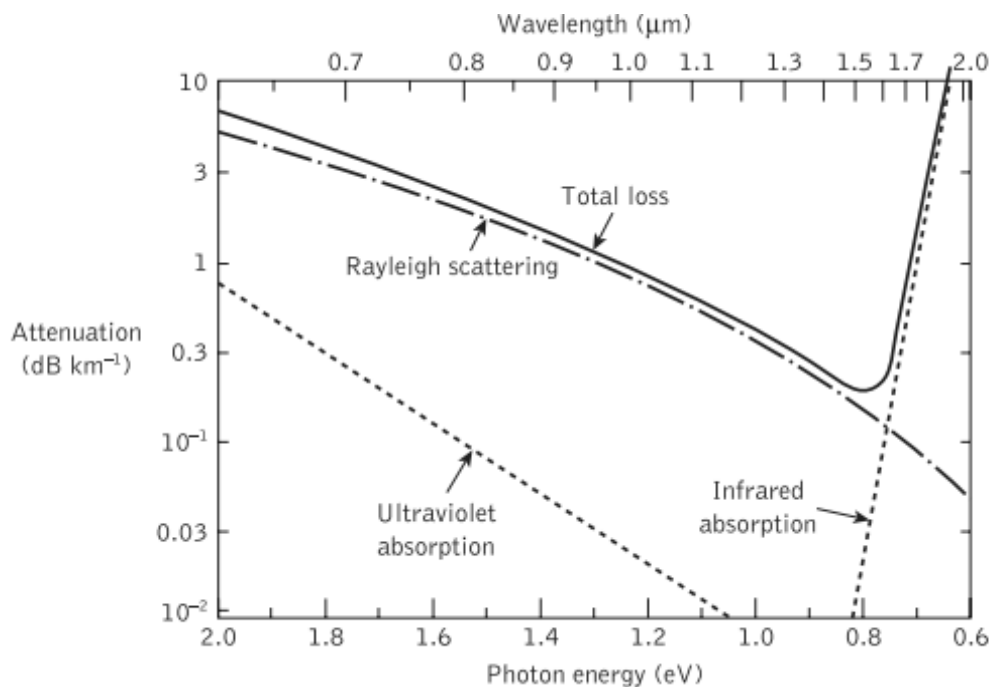


Figura 2.3. Gráfica de atenuaciones en la fibra óptica

Fuente [19]

Si es intrínseca, la absorción depende principalmente de la interacción de la luz con los materiales de sílice que componen la fibra óptica. Como se puede apreciar en la figura 2.3, la fibra tiene una baja atenuación entre $0.8\mu\text{m}$ y $1.7\mu\text{m}$, es decir no se transfiere mucha energía si la longitud de la onda de la luz está en el intervalo especificado anteriormente. Sin embargo, para longitudes mayores a $1.7\mu\text{m}$, se genera una alta absorción denominada absorción infrarroja, en la cual los fotones generan muchas vibraciones en el material lo cual se traduce en pérdidas en calor. De igual manera, para longitudes menores a $0.8\mu\text{m}$, se genera una alta absorción denominada absorción ultravioleta en la cual la energía de los fotones hace que se estimulen los electrones del material. Por la ley de la conservación de la energía, tanto en la absorción infrarroja como en la ultravioleta se está transfiriendo la energía de la luz a los componentes del material. Por ende, no es recomendable trabajar fuera del intervalo de $0.8\mu\text{m}$ a $1.7\mu\text{m}$.

Si es extrínseco, la absorción aumenta de acuerdo con que tanta presencia de otros elementos se encuentren en la fibra. El principal elemento que genera la atenuación es el ion OH proveniente del agua. Este ion siempre está presente debido a la presencia de vapor de agua en la fabricación. Este genera una gran atenuación en 1380nm, debido a que este elemento tiene un gran índice de absorción para la radiación electromagnética correspondiente a la frecuencia de esa longitud de onda. Sin embargo, con métodos modernos se ha podido reducir en gran medida la influencia de esta atenuación [19].

Scattering

Debido a la dispersión de la luz que se da a medida que se viaja en la fibra óptica se genera una atenuación de la intensidad de la misma. Esta dispersión es conocida como el scattering. Existen distintos tipos de scattering presentes en la fibra, siendo el que aporta la mayor atenuación el Rayleigh Scattering con un 97% de la atenuación respecto a los otros tipos. Cierta porción de esta potencia dispersada regresa a la fuente. A este fenómeno se lo conoce como backscattering.

Para mayor detalle del scattering, el cómo se produce y los distintos tipos, se invita al lector a leer el trabajo previo perteneciente a la fuente [1].

2.1.4. Reflectometría

En este trabajo se utilizarán los conceptos de reflectometría desarrollados en el trabajo anterior provenientes de la fuente [1]. Se recomienda fuertemente al lector revisar estos conceptos para poder comprender a detalle el planteamiento del trabajo de tesis.

Según la fuente indicada, se puede resaltar que la potencia que se recibe por el fenómeno de backscattering se puede calcular a partir de la ecuación 2.5.

$$P_B(z) = E_0 * \eta(z)e^{-2\alpha z} \quad (2.5)$$

Cuyos parámetros se explican a detalle en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Variables de la potencia de backscattering

Fuente [1]

Variables	Significado	Unidades
E_0	Energía inicial del pulso que ingresa a la fibra	J
$\eta(z)$	Factor de back scattering. Es un número que representa la potencia que no se pierde debido a la refracción del scattering. Depende de la apertura numérica.	W/J
$e^{-2\alpha z}$	El factor de atenuación lo largo de la longitud en el tramo de ida y vuelta de la fibra	Factor Adimensional

Además, es importante resaltar que la energía del pulso (E_0) se puede calcular a partir de la ecuación 2.6.

$$E_0 = P_0 * T \quad (2.6)$$

Los parámetros presentes en la ecuación 2.6 se pueden apreciar al detalle en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Variables de la energía del pulso

Fuente [1]

Variables	Significado	Unidades
P_0	Potencia óptica incidida en la fibra óptica	W
T	Ancho temporal del pulso óptico. Representa el intervalo de tiempo en el que se está emitiendo el pulso	s

De igual manera, tras identificar el tiempo recorrido desde que se emitió el pulso de luz hasta que se identifica un evento en la fibra t_e y la velocidad de grupo en la fibra óptica V_g , se puede llegar a identificar cualquier irregularidad a una posición z aplicando la ecuación 2.7, cuyos parámetros se encuentran explicados en la tabla 2.5 [1].

$$z(t_e) = \frac{v_g * t_e}{2} \quad (2.7)$$

Tabla 2.5. Variables en la detección de anomalías

Fuente [1]

Variables	Significado	Unidades
V_g	Velocidad de grupo en la fibra óptica	m/s
t_e	Tiempo de detección de un determinado evento	s

Arquitectura del OTDR

La arquitectura del OTDR, el elemento utilizado para realizar la reflectometría en el dominio del tiempo, se muestra en la figura 2.4.

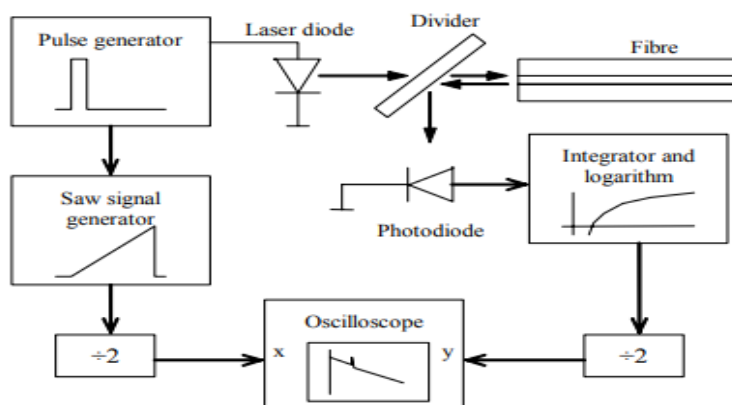


Figura 2.4. Arquitectura del OTDR

Fuente [20]

Como se puede identificar, el OTDR, por medio de un láser, emite un pulso de luz que ingresa en la fibra. Este pulso ingresa a un circulador óptico, el cual, según se explica en la fuente [1] “es un elemento de tres puertos que se encarga de transmitir la energía de un

puerto a otro sin que le llegue al tercero”. Este circulador es utilizado para enviar la luz a al cable de fibra óptica encargado de realizar el sensado deseado y así poder detectar los eventos.

Como se explicó anteriormente, en la fibra se produce el backscattering el cual regresa al inicio de la fibra en dirección al circulador óptico. El cambio de la dirección de la luz en el circulador permite redirigir la energía únicamente a un nuevo puerto en donde se encuentra un receptor óptico encargado de cuantificar la potencia de backscattering a lo largo del cable.

En forma simultánea a la medición de la potencia, el OTDR tiene un reloj interno encargado de medir los instantes en donde se detectan los pulsos de luz. Partiendo de la ecuación 2.7, el OTDR llega a identificar a que distancia se encuentra cualquier fenómeno a identificar. De igual manera, se llega a obtener una gráfica de la potencia recibida en función de la longitud de la fibra[21].

Resolución espacial

Según lo explicado en [1], todo sensado distribuido tiene una resolución espacial el cual representa la unidad de distancia en el cual se llega a poder reconocer una variación de luz. Usualmente las distancias menores no se llegan a detectar por la interferencia que se genera dentro del propio pulso de luz [22].

Matemáticamente se puede determinar la resolución espacial (SR) a partir de la ecuación 2.8.

$$SR = \frac{V_g * T}{2} \quad (2.8)$$

Cuyos parámetros se aprecian en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Variables en la detección de la resolución espacial

Fuente [1],

Variables	Significado	Unidades
V_g	Velocidad de grupo en la fibra óptica	m/s
T	Ancho temporal del pulso óptico que incide en la fibra	s

Como se aprecia en la ecuación 2.8, la **resolución** espacial es proporcional al parámetro T indicado en la tabla 2.6. Por tanto, para tener un sentido más preciso es importante trabajar con pulsos de luz pequeños.

Efecto del ruido en el OTDR

Según como se desarrolla en [1] es importante mantener el sistema lo más protegido al ruido posible. En la fibra se llegan a producir absorciones y emisiones espontáneas lo cual produce una variación aleatoria en la potencia recibida.

Para poder detectar una señal óptica es necesario que su relación señal a ruido (OSNR) sea mayor a la sensibilidad del fotodetector. De igual forma la potencia de backscattering necesaria para ser detectada, debe superar a la potencia equivalente del ruido (NEP). Aplicando la fórmula 2.9 se puede calcular el OSNR.

$$OSNR (dB) = P_B (dBm) - NEP (dBm) \quad (2.9)$$

Donde el P_B es la potencia del Backscattering obtenida de la ecuación 2.5.

Debido al comportamiento aleatorio del ruido, es importante mantener un valor de OSNR alto. Esto permite al sistema poder detectar con mejor confiabilidad los valores de potencia ópticas recibidos para intervalos de tiempo más largos.

Por tanto, como se puede llegar a concluir, para poder tener un sistema preciso a nivel de potencia y de posición en la fibra, es importante que los parámetros de la resolución espacial (SR) y la relación señal a ruido (OSNR) sean los más óptimos. Sin embargo; mientras el OSNR es directamente proporcional al ancho del pulso según la ecuación 2.6 y 2.9, la SR tiene una proporcionalidad inversa respecto a este parámetro según la ecuación 2.8. Por tanto, se debe concluir que en estos sistemas se debe tener un balance entre estos dos parámetros.

2.1.5. Deformación y ondas de presión

Ondas de presión

Las ondas de presión (también conocidas como ondas mecánicas) son una distorsión en el espacio que propaga la energía en una dirección. Esta distorsión es producida por la compresión y la expansión periódica de las partículas en un medio. Las ondas de presión se caracterizan por su frecuencia y su amplitud. La amplitud de la onda hace referencia al máximo desplazamiento de las moléculas producidas por la onda. Por otra parte, la frecuencia indica cuantas veces se repite el periodo de la onda (el tiempo en que vuelve al estado inicial) en un segundo [23].

Es bien sabido que cuando una onda de presión, tal como una vibración o una onda sonora, interactúa con un objeto, se aplica una presión en el área afectada. Asumiendo una onda de presión con una frecuencia f_v , la presión generada se puede calcular aplicando la ecuación 2.10.

$$P_r(x, t) = P_{r_{max}} \sin\left(\frac{1}{\rho c^2} x - 2\pi f_v t\right) \quad (2.10)$$

Donde $P_r(x, t)$ es la presión instantánea, ρ es la densidad del medio, c es la velocidad de la onda en el medio y $P_{r_{max}}$ es la presión máxima de la onda, la cual se puede calcular aplicando la ecuación 2.11

$$P_{r_{max}} = 2\pi\rho c f_v A_v \quad (2.11)$$

Donde A_v es la amplitud de la onda de presión [23].

Deformación

Cuando una presión es aplicada a un objeto, las moléculas de este se mueven en la dirección de la fuerza aplicada. Ese desplazamiento de las moléculas produce un cambio en la longitud inicial del objeto. Ese cambio en la longitud debido a una presión se denomina deformación la cual se puede apreciar en la imagen 2.8. A partir de la ley de Hook, la cual se puede apreciar en la ecuación 2.12, se puede determinar la deformación de un determinado objeto a partir de la presión aplicada [24].

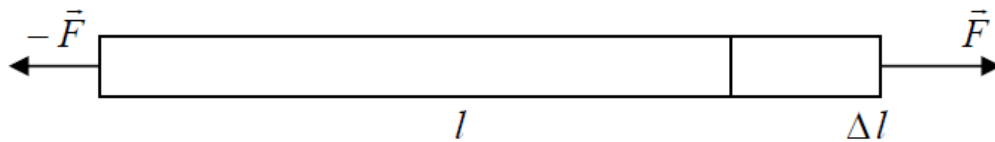


Figura 2.5. Deformación aplicada por una fuerza

Fuente [24]

$$\Delta l = l * \frac{Pr}{Y} \quad (2.12)$$

Donde Δl es la deformación, l es la longitud del objeto en la dirección de la fuerza, P es la presión ejercida y Y es el módulo de Young del objeto.

Adicionalmente, es sabido que toda contracción o tracción en un determinado eje, genera una respuesta de forma inversa en los ejes donde no se aplicó la tensión. En otras palabras, una contracción en el eje x de un objeto, tal como se muestra en la imagen 2.9, tendrá una expansión en los ejes y , z . Esto se puede calcular cuantitativamente a partir de la ecuación 2.13 [24].

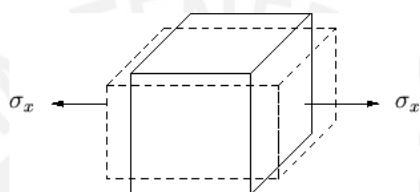


Figura 2.6. Deformación por tracción o compresión

Fuente [24]

$$\frac{\Delta l_x}{l_x} = \sigma_{xy} \frac{\Delta l_y}{l_y} \quad (2.13)$$

Donde l_x es la longitud del objeto en el eje x , Δl_x la deformación que se produjo en el eje x y σ_{xy} el coeficiente de Poisson entre los ejes x , y .

2.1.6. Sensado acústico distribuido con fibra óptica

Introducción

El sensado acústico distribuido por fibra óptica (DAS por sus siglas en inglés) es un principio de sensado que permite identificar pulsos de sonido que interactúen con la fibra.

Los sensores que se basan en este principio identifican los cambios de intensidad de la

luz de Rayleigh backscattering en una fibra óptica monomodo. Por tanto, para poder implementar este tipo de sensores es necesario implementar un sistema similar al funcionamiento del OTDR como se mostró en la figura 2.4 [22].

De forma similar a la reflectometría, este sensor es capaz de identificar la posición a lo largo de la fibra en la cual se está emitiendo el evento, en este caso específico un pulso de sonido. Sin embargo, a diferencia de la reflectometría convencional, aquí los pulsos de luz que emite el láser deben ser coherentes para que los pulsos sean detectados. De igual manera, con este método se puede identificar la frecuencia del pulso de sonido detectado en un rango de frecuencias muy bajo (aproximadamente kilo Hertz) lo cual pocos sensores son capaces de identificar [25].

Fundamentos:

Como se explicó anteriormente en la sección de reflectometría, la luz se refleja dentro de la fibra óptica debido a que esta cuenta con puntos muy pequeños de no homogeneidad en donde la densidad del material varía y por ende también el índice de refracción produciendo una dispersión. A esos puntos se le denomina **scattering centers**, ya que son los puntos que generan el Raleigh scattering. Cuando la luz no es coherente según lo explicado anteriormente en el capítulo 2.1.1.a, distintas componentes frecuenciales de un pulso emitido del OTDR tienen distintas fases, por ende, cuando interactúan con los scattering centers no se genera un patrón de interferencia, ya que las interferencias que se generan son diferentes entre las distintas componentes frecuenciales. Por ende, el resultado del OTDR siempre termina siendo el promedio de todas esas interferencias de cada uno de los componentes [25].

Sin embargo, cuando la luz es coherente, es decir la luz se encuentra a una distancia menor a l_c según la ecuación 2.4, la fase entre las distintas componentes frecuenciales a lo largo

de los pulsos es constante. Por ende, cuando el pulso interactúa con los distintos scattering centers, las reflexiones en intervalo de la fibra interfieren de igual manera para todos los pulsos. De esta forma, en cierta porción de la fibra óptica se tendrá un patrón de interferencia el cual depende de la distribución de los scattering centers en la fibra, los cuales son aleatorios en el espacio, pero fijos en el tiempo. Esto quiere decir que a pesar de que no se puedan identificar la posición exacta de estos puntos, mientras la fibra se mantenga en las mismas condiciones, estos puntos se mantendrán en su posición y por ende el patrón resultante a condiciones normales, el cual se denomina **patrón de interferencia**, se mantendrá constante. A este tipo de reflectometría se le conoce como ϕ -OTDR [25], [26]. En la imagen 2.10 se puede apreciar cómo es la firma de interferencia de un ϕ -OTDR y la diferencia respecto al patrón de un OTDR tradicional mostrado en la figura 2.4.

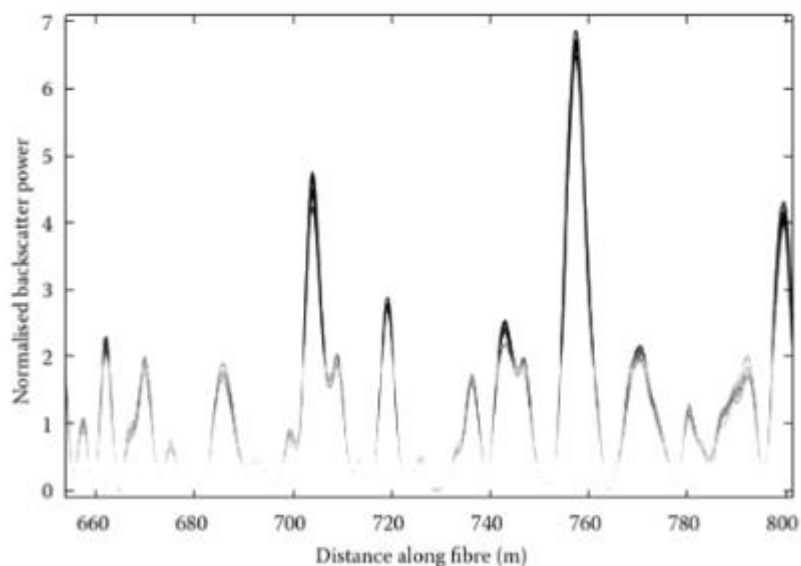


Figura 2.7. Patrón de interferencia de un ϕ -OTDR

Fuente [26]

Matemáticamente, como la posición de los scattering centers es aleatoria, no se puede tener un modelo completamente analítico del ϕ -OTDR [26], sin embargo, si se puede tener un modelo probabilístico el cual se detalla a continuación. En primer lugar, se puede dividir la fibra óptica en N segmentos de longitud d_{sc} , mucho más pequeños que la resolución espacial, en los cuales se considera que hay solo un scattering center en ese segmento. Por tanto, se puede identificar la posición del scattering center m a partir de la ecuación 2.14.

$$z_{sc}^m = m * d + \delta\zeta^m \quad (2.14)$$

Los parámetros se aprecian en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Posición de los scattering centers

Fuente [26]

Variables	Significado	Unidades
m	Número del scattering center	Adimensional
d	Distancia al scattering center anterior	m
$\delta\zeta^m$	variable uniformemente distribuida en el intervalo [0, d_{sc}]	m

Entonces, según lo que explica la fuente [26], el campo eléctrico resultante que se ve dispersado en un punto, representa la suma de todos los campos eléctricos que han sido dispersados por distintos scattering centers en un intervalo de longitud igual a la

resolución espacial. Por tanto, teniendo un pulso con una resolución espacial SR y con un campo eléctrico E que se propaga en la fibra con una intensidad inicial de campo eléctrico de E_0 , se puede calcular que la intensidad del campo eléctrico que se recibe en el Φ -OTDR proveniente de una distancia z a partir de la ecuación 2.15.

$$E(z) = E_0 * e^{-\alpha z} * \left[\sum_{m=z-\frac{SR}{2}}^{z+\frac{SR}{2}} a_m * w * e^{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_1 (z_{sc}^m - z)\right)} \right] \quad (2.15)$$

Los parámetros de la ecuación 2.15 se aprecian en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Campo eléctrico en función de la distancia

Fuente [26]

Variables	Significado	Unidades
$e^{-\alpha z}$	Atenuación en el recorrido de la fibra	Adimensional
a_m	Factor de atenuación del campo eléctrico producido por el scattering center m	Adimensional
w	Ventana que define la forma del pulso	Adimensional
$e^{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_1 (z_{sc}^m - z)\right)}$	Factor de desfase producido en el scattering center en la posición z_{sc}^m .	Adimensional

Cabe resaltar que una buena aproximación sería que el SR sea 1000 veces mayor que el d_{sc} , no obstante, basta una relación de 20 veces para que se cumpla el factor de aleatoriedad [26].

En general la ecuación 2.15 se puede simplificar poniéndolo en función de 2 variables aleatorias, $A_s(t)$ que representa la amplitud con una distribución aleatoria de Rayleigh y $\varphi(t)$ que representa la fase con una distribución uniforme. Entonces emitiendo con un láser a frecuencia angular central de w_s con una fase inicial de emisión de φ_s , se tiene que el campo eléctrico se puede calcular a partir de la ecuación 2.16

$$E(t) = E_0 A_s(t) e^{j(w_s t + \varphi_s + \varphi(t))} \quad (2.16)$$

Sin embargo, la presencia de una onda mecánica tal como un pulso de sonido varía la densidad de la zona de la fibra óptica en la cual está interactuando y por ende varía la posición de los scattering centers en esa zona. Al trabajarse con láser de longitudes de ondas en el orden de los micrómetros, un microscópico cambio en la posición de los scattering centers involucra un desfase con respecto al modelo inicial. Por tanto, interferencias constructivas pueden pasar a ser destructivas y viceversa. De esa manera la luz reflejada proveniente de esa zona tendrá un patrón diferente respecto al patrón generado en las condiciones iniciales. Por ende, se puede identificar la presencia de una perturbación causada por una onda de sonido [26].

Identificación de frecuencias de ondas mecánicas

Es importante considerar que cuando se usa DAS se usan dos ejes de tiempo para detectar los pulsos de sonido, los cuales se detallan a continuación.

El primer tiempo conocido como el rápido (t_d), es el tiempo que se usa para detectar la posición del evento en la fibra (similar al OTDR convencional) [26]. Este tiempo es igual al tiempo en que se demora obtener la primera muestra y está limitado por el conversor analógico digital del equipo y la resolución espacial. Por ende, siendo f_d la frecuencia a

la que el OTDR recoge las muestras el tiempo rápido se puede calcular a partir de la ecuación 2.17.

$$t_d = \frac{1}{f_d} \quad (2.17)$$

El segundo tiempo, conocido como el tiempo lento (t_r), es el tiempo que se usa para detectar la frecuencia de vibración del pulso de sonido. Este tiempo es igual al tiempo en que se demora el OTDR en enviar un pulso a lo largo de la longitud de la fibra. Esto es debido a que el evento que se detecta en la fibra, ocurre en un punto específico a través de su longitud y por ende para tener una segunda muestra de este, se debe esperar hasta que llegue el siguiente pulso [26]. Siendo f_r la frecuencia en la que el OTDR emite pulsos de luz, se sabe que el tiempo lento se puede obtener a partir de la ecuación 2.18.

$$t_r = \frac{1}{f_r} \quad (2.18)$$

Sin embargo, según [22], por la ley de Nyquist la máxima frecuencia a la que se puede detectar con una frecuencia de muestreo de f_r es igual a $f_r/2$. Por ende, pulsos de sonido a altas frecuencias no pueden ser detectados por este método. La frecuencia f_r está limitada por la longitud de la fibra, ya que no se pueden tener dos pulsos de luz dentro de la misma fibra viajando al mismo tiempo. Por ende, se puede calcular la frecuencia de muestreo mínima por medio de la ecuación 2.19.

$$f_{r_{min}} = \frac{V_p}{2L} \quad (2.19)$$

siendo L la longitud de la fibra y V_p la velocidad de propagación en la fibra.

Lo explicado anteriormente se puede apreciar en la figura 2.8 la cual muestra cómo actúan estos dos tiempos en un intervalo de 3 pulsos y la forma en que se detecta una onda mecánica en la posición correspondiente a un tiempo t_i .

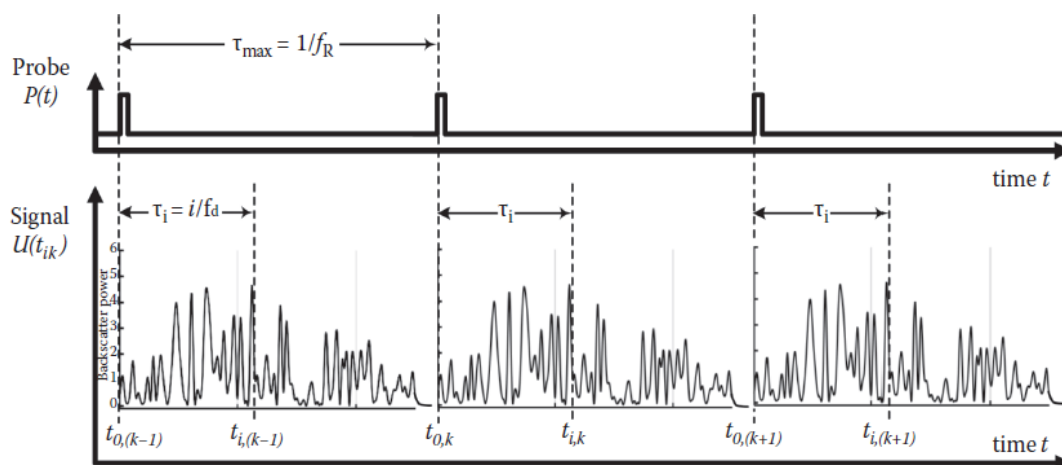


Figura 2.8. Variables temporales en un patrón de ϕ -OTDR

Fuente [26]

A diferencia del OTDR convencional, con DAS se almacena una gran cantidad de información. En primer lugar, es importante tener bien definido y almacenado el patrón de referencia. En segundo lugar, se debe evaluar los cambios presentes en cada punto de la resolución espacial con respecto al patrón original, y en caso se tenga un cambio considerable, almacenar la data para posteriormente poder identificar la frecuencia del pulso en distintas muestras.

2.2. Estado del arte

La técnica de DAS es una técnica relativamente novedosa, en la cual la mayoría de los estudios provienen del 2016 en adelante. Principalmente los estudios e investigaciones relacionadas al tema se enfocan en dos aspectos. Un primer aspecto es mejorar el sentido con este método, obteniendo un mejor OSNR y por ende mayor precisión en el sentido

de la onda mecánica. El otro aspecto es respecto al desarrollo de posibles aplicaciones para el uso de esta tecnología. A continuación, se describen algunas de las investigaciones que se dieron respecto a esta temática.

Una aplicación reciente, que se dio en el 2019 por un grupo de investigadores de China formado por Peng Zhu, Hongqiao Wen, Qian Che, Xinyu Li y Xiao Liu diseñaron un sistema DAS para detectar las fugas en un cable de alto voltaje (XLPE) [27].

Se sabe que los cables XLPE a veces tienen descargas parciales (PD) en un componente dieléctrico aislante que es usado como protector de este de tal manera que no se emitan rayos fuera del cable. Sin embargo, el dieléctrico absorbe la energía debido a las PD, debilitando su propiedad de aislamiento con el tiempo y a largo plazo llegan a dañar los generadores de voltaje con las corrientes de retorno. Se sabe que cuando ocurre un PD, se generan unas vibraciones en la zona del cable donde se está viendo afectado ese fenómeno. Además, de acuerdo con la vibración emitida se puede identificar el estado del componente dieléctrico del cable. Por tanto, en la investigación, se desarrolló un sistema DAS para prever y corregir estos fenómenos dentro de los cables XLPE [27].

Como se explicó en Rayleigh debido a que la potencia del DAS tiende a ser baja, lo que implica un OSNR bajo, en la investigación se modificó el sistema de detección acústica. Se implementaron múltiples rejillas de Bragg a una distancia fija L y un interferómetro Michelson tal como se aprecia en la imagen 2.12.

Puesto que la señal DAS está compuesta de señales aleatorias debido a la aleatoriedad espacial de los puntos de scattering en la fibra, lo que se busca calcular es dado una potencia mínima entrante φ , cuanto es la desviación estándar, la cual se calcula de acuerdo con la ecuación 2.20.

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{z_{\rho}}{2OSNR_S}} \quad (2.20)$$

Siendo z_{ρ} el parámetro que define la probabilidad que la relación señal a ruido dinámica supere la unidad. Este parámetro depende de la longitud zona de la fibra que se está evaluando ya que mientras mayor sea la longitud de la fibra, más probabilidad se tiene que alguna región se encuentre por debajo del $OSNR=1$. $OSNR_S$ la relación señal a ruido óptica cuando la fibra no se encuentra expuesta a una onda acústica y σ_{φ} la desviación estándar de la amplitud a presencia de una onda mecánica, el cual define que, para mayores valores se indica que se detectarían mayor cambio a presencia de una onda acústica [28].

Otra investigación desarrollada el 2017 por Konstantin Hicke and Katerina Kribber en Alemania buscaron desarrollar un sistema de sensado acústico submarino que permita distancias de hasta 100km y resistir las condiciones subacuáticas.

Los investigadores decidieron utilizar el DAS debido a su reducido tamaño respecto a otro tipo de sensores eléctricos, la habilidad de ser distribuido, su resistencia a las condiciones subacuáticas propias de los sensores distribuidos y su resistencia electromagnética al trabajar con altos voltajes. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue desarrollar el sistema distribuido de detección de ondas acústicas. Principalmente para identificar distintos eventos que les suceden a los cables submarinos, tal como que un ancla impacte en el cable, una red de pesca se enrede en el cable o se esté realizando una

construcción sobre el cable. Los distintos eventos producen ondas acústicas de distinta frecuencia, los cuales pueden ser identificados con el sistema y la posición a la que se encuentra con la teoría que fue explicada en los capítulos anteriores [29]

Para ello, dentro de los cables de poder que alimentan los molinos, agregaron un cable de fibra óptica para poder realizar el sensado. Después, sumergieron el cable de más de 55km en una piscina. Después, empezaron a evaluar un intervalo de longitud de la fibra en donde primero evaluaban lo que sucedía cuando se impactaba un desatornillador en la zona evaluada del cable, y luego evaluaban lo que sucedía cuando se ejercía presión en la zona del cable. En ambos casos, se pudo identificar la presencia de los eventos por medio de la variación de la amplitud y la frecuencia [29]

El experimento permitió comprobar que se pueden detectar con precisión vibraciones de bajas frecuencias a grandes distancias de hasta más de 55km utilizando el sistema DAS bajo el agua [29]

De igual forma al caso anterior, en el 2017 el grupo de investigadores formado por Konstantin Hicke, Maria-Teresa Hussels, Rene Eisermann, Sebastian Chruscicki y Katerina Krebber realizaron un estudio el cual buscaba aplicar el sensado acústico distribuido con fibra óptica para detectar distintos eventos en estructuras industriales y civiles. Especialmente para monitorear tuberías, rodillos de transporte de maquinaria pesada y cables submarinos de alimentación para molinos [30]

En el caso de las tuberías, se sabe que la corrosión de estas genera ondas acústicas. Por tanto, se puede detectar cuando en una zona de la tubería se está corroyendo y repararla antes de que se rompa. De igual manera, se puede detectar bloqueos en las tuberías por las vibraciones que emiten los fluidos al verse obstruidos [30].

El objetivo del experimento fue observar de qué manera conviene instalar la fibra en las tuberías de forma que se pueda recuperar la mejor señal posible de las vibraciones, es

decir, tener el mejor OSNR. La primera prueba fue pegar la fibra completamente en el largo de la tubería, mientras que el segundo experimento fue pegar la fibra en zonas discretas de esta. En ambos casos se emitió una onda ultrasónica de 4kHz en una parte de la tubería para realizar la medición [30].

Se observó que cuando la fibra se adhiere en la tubería por completo el OSNR de la señal recibida mejora en un factor de 20 con respecto al OSNR de la señal cuando está pegada puntos discretos. Esto se debe a la reducción de las vibraciones debido a los grados de libertad de la fibra pegada de forma discreta. Por tanto, con ello se llegó a la conclusión que cuando se quiera evaluar las vibraciones en tuberías, se debe pegar la fibra a lo largo de todo el eje de la tubería para tener el mejor OSNR [30].

En el caso de los rodillos de transporte de maquinaria pesada, los autores especifican que cuando los rodillos están oxidados por el tiempo de uso, o están haciendo un esfuerzo de más al llevar la maquinaria pesada, se emiten vibraciones no deseadas. No poder detectar estas vibraciones a tiempo, hace que el sistema colapse, lo cual puede dañar la maquinaria que se está llevando y se tiene que invertir en reparación [30].

El objetivo del experimento fue demostrar cómo se puede identificar el estado del rodillo en una maquinaria por las vibraciones que este emite utilizando un sistema DAS. Por tanto, para ello se desplegó la fibra en el rodillo para hacer la medición [30].

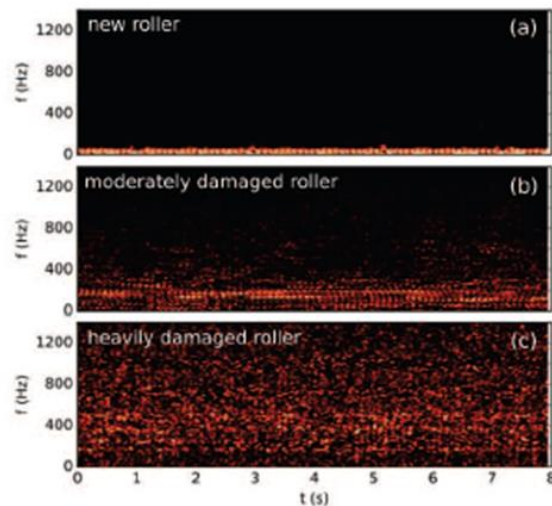


Figura 2.10. Detección de Vibraciones generadas en distintos rodillos industriales

Fuente [30]

Como se observa en la imagen 2.13, se pudo comprobar que un rodillo nuevo y en buen estado no genera muchas vibraciones, por otra parte, mientras más dañado se encuentre el rodillo, más modos de vibración se darán. Por tanto, de esta manera se puede comprobar el estado de los rodillos y de esta manera garantizar la estabilidad del sistema [30].

Además, en el 2019 un grupo de investigadores chinos formados por Huijuan Wu, Jiping Chen, Xiangrong Liu, Yao Xiao, Mengjiao Wang, Yi Zheng y Yunjiang Rao diseñaron un sistema DAS de detección de distintos eventos a través de frecuencias en tuberías subterráneas, tales como taladros cercanos, temblores, etc. Utilizando técnicas de inteligencia artificial en el procesamiento [31].

Específicamente, los autores primero realizaron un proceso de reducción del ruido para tener la señal más limpia posible. Posteriormente, utilizaron una red neuronal CNN para preprocesar la data de forma de obtener la mayor precisión en la clasificación. Para la clasificación evaluaron distintos tipos de modelos, tales como el *Random Forest*, el

Support Vector Machines (SVM), etc. Al final de las pruebas, el modelo que obtuvo mayor precisión fue el SVM, por tanto, este fue el modelo utilizado.

A través de este sistema se logró identificar con alta precisión el tipo de evento que emitía las vibraciones en la fibra, pudiendo así reducir las vibraciones causadas por el ruido con la red CNN. De igual forma, se comprobó que, dentro de los distintos modelos de clasificación posibles, el SMV fue el más preciso y el que da mejores resultados para las aplicaciones de DAS.

Por último, en el 2019, Zinan Wang; Bin Zhang, Ji Xiong; Yun Fu, Shengtao Lin, Jialin Jiang; Yongxiang Chen, Yue Wu, Qingyang Meng y Yunjiang Rao, un grupo de investigadores del *national natural foundation of China*, realizaron una investigación para poder mejorar la sensibilidad del sistema de $\phi OTDR$ para las aplicaciones del IoT. Se basaron en el principio que, al igual que en los otros sensores de fibra óptica como Raman y Brillouin, se pueden aplicar códigos convolucionales para mejorar el OSNR del sistema. Sin embargo, como el $\phi OTDR$ no presenta un comportamiento lineal, no se puede aplicar directamente estos códigos. Por tanto, se busca desarrollar uno códigos que permitan mejorar el OSNR del sistema DAS sin afectar otros parámetros tal como la resolución espacial o el tiempo de repetición de pulsos [32].

Como se explicó anteriormente en la ecuación 2.16, utilizando un sistema DAS, tanto la amplitud como la fase recibida son variables aleatorias con distribución Rayleigh y uniforme respectivamente. Un método alternativo para medir las vibraciones consta de detectar el cambio de fase en el sistema añadiéndole un sistema de recepción coherente, en el cual se pueden detectar tanto la fase del sistema como su amplitud. En este trabajo, los investigadores optaron por ello. Por tanto, a través de un oscilador local sincronizado a la frecuencia del láser se consigue que la respuesta del sensado a partir de la ecuación 2.21.

$$I(t) = rA_s(t)A_L \cos(\phi(t) + \phi_d) \quad (2.21)$$

Siendo $A_s(t)$ la amplitud del Rayleigh Scattering, A_L la amplitud del oscilador local, $\phi(t)$ la fase del scattering, ϕ_d la diferencia de fase del láser y del oscilador local y r el factor de conversión óptico-eléctrico [32].

Entonces, creando un arreglo C de M códigos de longitud temporal τ , la intensidad recibida tras aplicar el oscilador local se calcula aplicando la ecuación 2.22.

$$I_{code}(t) = \sum_{p=1}^M rC_p A_s(t - \tau p) \cos(\Delta\omega t + \phi_d + \phi(t - p\tau)) + \sum_{p=1}^{M-1} \sum_{q=p+1}^M 2rC_p C_q A_s(t - q\tau) \cos(\phi_{pq}) \quad (2.22)$$

Donde C_p Representa la amplitud del código p , $\Delta\omega$ la diferencia de frecuencias entre el laser y el oscilador local y ϕ_{pq} la diferencia de fases entre dos códigos [32].

Como se observa, el primer término representa la suma del aporte de cada código, mientras que el segundo término es la interferencia que ocurren entre los pulsos debido a los efectos no lineales. Esta interferencia se busca eliminar de manera que se puedan usar los códigos sin afectar el sistema. Mientras $\Delta\omega$ sea diferente de cero, es decir la frecuencia del láser y la del oscilador local sea diferente, se puede eliminar la interferencia entre los códigos con un filtro pasa altos con una frecuencia de corte menor a $\Delta\omega$ [32].

A partir de un receptor superheterodino se puede llevar la señal de frecuencia $\Delta\omega$ a banda base. Con ese proceso se logra llegar a que la intensidad que se obtiene utilizando el código sigue la fórmula que se muestra en la ecuación 2.23.

$$I_{code}(t) = C * I(t) \quad (2.23)$$

Siendo C el arreglo de los códigos, $I(t)$ la intensidad cuando solo se trabaja con un solo pulso y $*$ el operador de convolución.

A partir de la teoría descrita anteriormente, los investigadores utilizaron el código *Golay* un conjunto de 4 códigos los cuales sumados permiten tener una ganancia del SNR de la señal de $2M$, siendo M la cantidad de pulsos en un código. Por tanto, con códigos lo suficientemente grandes, se puede llegar a incrementar el SNR en gran medida, tal como se demostraron en las pruebas de esta investigación [32].

En conclusión, con esta investigación se permitió el uso de códigos convolucionales con el fin de mejorar el OSNR de la señal recibida en un sistema DAS.



CAPITULO 3

Diseño del sistema de sensado

3.1. Sistema propuesto

Para el sistema propuesto, se tomó de referencia la arquitectura de un OTDR convencional. Sin embargo, la principal diferencia es el uso del láser de alta coherencia que emite los pulsos de luz para poder generar el patrón de interferencia, y se reduce el número de promediados realizado con el fin de poder identificar con claridad los eventos a mayores frecuencias.

A continuación, en la imagen 3.1 se aprecia cómo será el sistema.

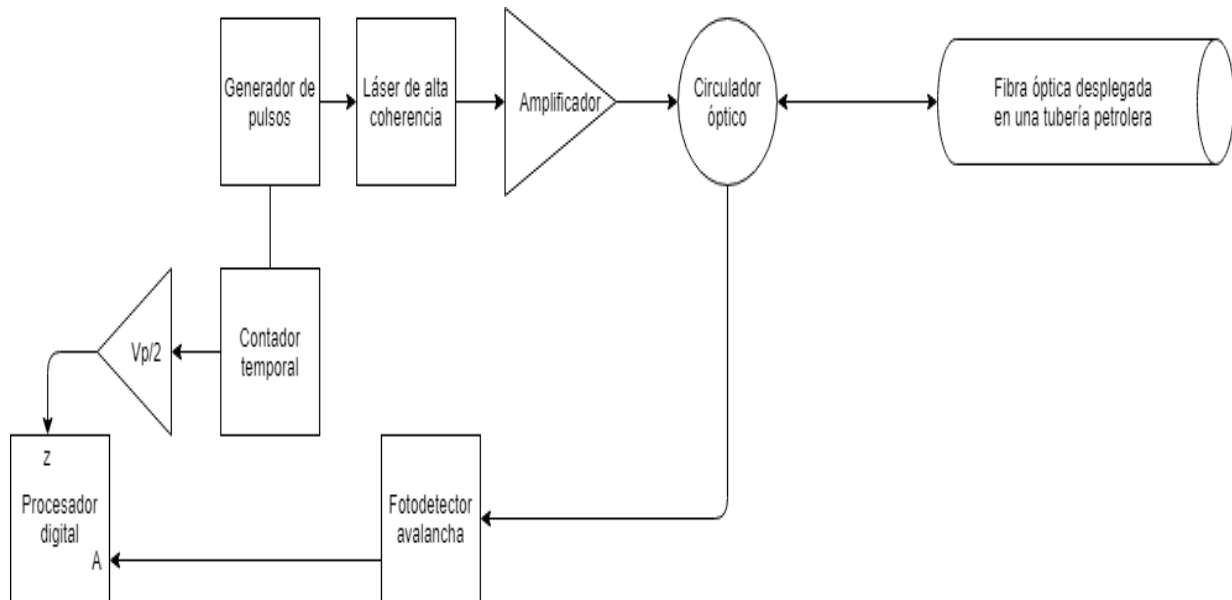


Figura 3.1. Sistema DAS para detección de fallas en tuberías petroleras

Fuente: [Elaboración propia]

El objetivo es que a partir del láser continuo de alta coherencia se emitan pulsos que viajen en la fibra. Estos pulsos deben ser amplificados con el amplificador de forma de tener la suficiente potencia que genere un buen nivel de back scattering sin producir efectos no lineales en la fibra óptica.

Estos pulsos de luz que se emiten desde el láser pasan por un circulador óptico, de tal manera que cuando se genere el backscattering, la luz no regrese al láser, sino que se dirija al fotorreceptor. Debido a las bajas potencias del backscattering es importante utilizar un fotorreceptor avalancha, el cual tiene el beneficio de amplificar la potencia de la señal aparte de recuperarla.

La información recuperada es almacenada en una memoria junto con la distancia relativa a la fibra, la cual es calculada a partir del tiempo que se emite el pulso según la ecuación 2.7. Entonces, se almacena en memoria una matriz tridimensional cuyos ejes son distancia, intensidad y número de pulso, para que de esa manera se pueda evaluar la

presencia de una vibración en los distintos pulsos. Una vez terminada la recolección de datos, se procede a analizar lo que se encuentra almacenado en memoria de forma que se puedan identificar los fenómenos.

Para el caso se desee detectar vibraciones en una estructura petrolera, la fibra se despliega de forma distribuida en la superficie de la tubería de la extracción. De esta forma, en caso se detecte una vibración en una zona de la tubería, se puede identificar a lo largo de su longitud. Para las pruebas, se puede forzar la vibración emitiendo un generador de pulsos en una zona de prueba.

A continuación, se definirán los equipos a utilizar y los parámetros relacionados a los equipos. De igual manera se especificará como el sistema llega a solucionar distintos problemas actuales.

3.1.1. Selección del Láser

Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, es importante considerar un láser con un ancho de haz muy pequeño de forma que se mantenga coherente por largas distancias en la fibra óptica. Además, para la selección del láser también se consideró la potencia de transmisión de forma que se puede emitir una buena potencia a la fibra de manera que se obtenga un buen nivel de backscattering.

Según las características dadas se decidió utilizar el SFL1550S. *External Cavity Laser, SM Fiber, FC/APC, 1550 nm, 40 mW, Butterfly*, el cual se puede apreciar en la imagen

3.2. Las características de este láser se aprecian en la tabla 3.1.



Figura 3.2. *External Cavity Laser*

Fuente [33]

Tabla 3.1. Parámetros del láser SFL1550S

Fuente [33]

Parámetro	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo
Longitud de onda central	λ_c	1549.5nm	1550nm	1550.5nm
Ancho de haz	Δf	-	50kHz	100kHz
Potencia óptica	P_o	25mW	40mW	-
Temperatura de operación	T_o	10°C	25°C	60°C

Por tanto, como se aprecia en la tabla 3.1, este láser al tener un ancho de haz medio de 50kHz (0.4fm de longitud de onda) y llegando a emitir a un pulso gaussiano, aplicando la ecuación 2.3 y 2.4 se puede calcular el tiempo de coherencia según se muestra en la ecuación 3.1.

$$\tau_c = \frac{\sqrt{8\pi \ln(2)}}{2\pi * 50k} = 13.28\mu s$$

$$l_c = \frac{3 * 10^8}{1.47} * 13.28 * 10^{-6} = 2.710km \quad (3.1)$$

Por tanto, según lo mostrado en la ecuación 3.1, como el pulso que se emite tiene un recorrido de ida y vuelta, entonces la distancia máxima es la mitad de la distancia de coherencia. Por tanto, utilizando este láser se pueden detectar eventos de hasta **1.35km de distancia**.

3.1.2. Selección del generador de pulsos

Para la selección del generador de pulsos se tomó de referencia las ecuaciones 2.6 y 2.8. Como se indicó anteriormente, la ecuación 2.6 indica que la longitud del pulso es directamente proporcional a la energía que ingresa a la fibra. Por tanto, siguiendo la ecuación 2.9 se tendrá una mayor sensibilidad y por ende una mayor robustez frente al ruido. Por otra parte, a partir de la ecuación 2.8 se indica que una mayor duración del pulso implica un mayor número de resolución espacial. Esto implica que será más complicado poder identificar con precisión la posición de cualquier evento.

Al tener 1.35km de distancia, se propone una resolución espacial de un metro, de manera que se tenga un balance entre la sensibilidad y la precisión al momento de detectar las vibraciones a lo largo de la fibra. Al tener una resolución de 1 metro, se estarían obteniendo 1350 muestras por pulso.

Además, es importante considerar que no se necesita una resolución tan minuciosa debido a que la presencia de una vibración también afecta las zonas vecinas, por tanto, si se tiene una resolución muy baja, de igual forma no se apreciaría ningún cambio.

Por tanto, definiendo una resolución espacial de 1m para una fibra con índice de refracción de 1.47, según la ecuación 2.8 se calcula lo mostrado en la ecuación 3.2.

$$1 = \frac{3 * 10^8}{1.47 * 2} * T$$

$$T = 10ns \quad (3.2)$$

Por ende, según lo calculado en la ecuación 3.2, se necesitaría un generador de pulsos que emita pulsos de 10ns de ancho.

Entonces el generador de pulsos se construirá a partir de un modulador Mach Zender, el cual es un equipo, como se observa en la imagen 3.2, en el cual cuenta con 3 principales puertos. En el primero incide la luz, en el segundo se aplica un voltaje y el tercero es la salida ya modulada. El voltaje aplicado define el desfase que se generan en las 2 ramas de la guía de onda, lo cual puede afectar que al sumarse interfieran constructiva o destructivamente. Por tanto, el pulso se genera cuando se aplica un voltaje tal que la onda genere una interferencia constructiva y se produce la banda de guarda cuando interfieren destructivamente [34].

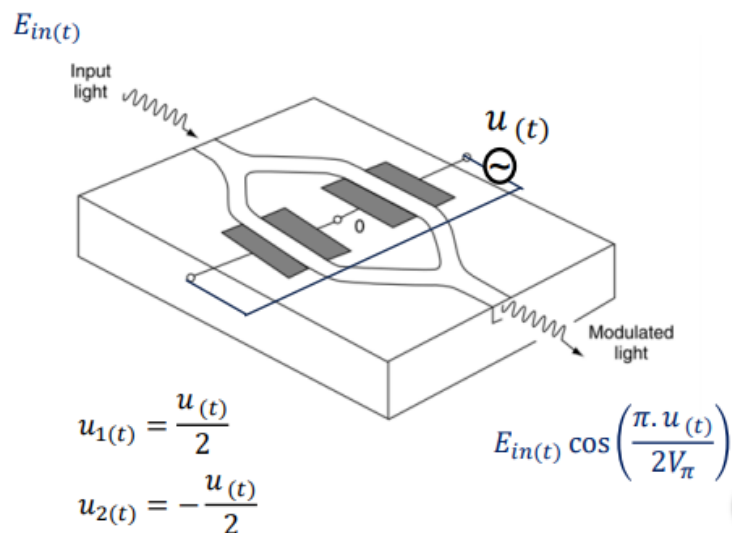


Figura 3.3. Modulador Mach Zender.

Fuente [34]

A partir de lo explicado anteriormente se decidió utilizar el modulador electroóptico de litio, el cual está adaptado a la longitud de 1550nm, una ratio de extinción de 20dB y requiere un voltaje de 6.5V máximo para generar el cero, tal como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros del modulador Mach Zender LN81S-FC

Fuente [35]

Parámetro	Valor
Longitud de onda de operación	1525nm – 1615nm
Ratio de extinción	> 20dB
V_{π}	< 6.5V

Además del modulador, se necesita el equipo generador de pulsos compatible con este y que al mismo tiempo permita unir el láser continuo con el modulador. Siguiendo el mismo fabricante, se decidió escoger el MX10A de ThorLabs el cual se encarga de lo que se mencionó anteriormente. En la tabla 3.3 se aprecian sus características.

Cabe resaltar que la frecuencia con la que se emitirán los pulsos depende de la longitud de la fibra. El objetivo es que no se tengan dos pulsos en simultaneo dentro de la fibra. Por tanto, el tiempo de repetición t_r debe ser mayor al tiempo que se demora el pulso de luz en recorrer la fibra ida y vuelta.

Tabla 3.3. Parámetros del modulador Mach Zender SFL1550S

Fuente [36]

Parámetro	Valor
Longitud de onda de operación	1310nm; 1550nm; 1590nm
Voltaje	4V (maximo)
Tiempo de subida	35ps

3.1.3. Selección de la fibra óptica

Para la fibra óptica es necesario considerar una fibra monomodo, para que se puedan generar las interferencias, y que presente un buen nivel de backscattering. Para ello se decidió evaluar 8 tipos de fibra monomodo de la empresa Corning.

Al final se decidió optar por la fibra Corning SMF-28e+, la cual se caracteriza por ser la más desplegada en el mundo, por tanto, resulta ser la más comercial y por ende la más

fácil de obtener a precio reducido. Además, esta fibra no presenta atenuaciones tan bajas a diferencia de modelos superiores, lo que permite obtener mayor backscattering. Por último, como la fibra va a estar pegada estáticamente en la tubería, no es necesario una fibra que permita alto dobles.

A continuación, en la tabla 3.4 se presentan las características de la fibra que se utilizarán para calcular el backscattering.

Tabla 3.4. Parámetros de la fibra Corning SMF-28e+

Fuente [37]

Parámetro	Valor
Atenuación a 1550nm	0.2dB/km
Atenuación a 1550nm	$46\mu np/m$
Longitud de onda de corte	1260nm
Apertura numérica	0.14
Índice de refracción a 1550nm<	1.47
Factor de backscattering ($\eta(z)$)	9.37 W/J
Diámetro del núcleo	$8.2\mu m$

3.1.4 Selección del circulador óptico

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del circulador es principalmente llevar la luz del láser a la fibra y el backscattering de la fibra al fotorreceptor. Para ello una opción

es utilizar un circulador óptico 6015-3 de Thorlabs, el cual es un circulador adaptado a la longitud de onda de 1550nm cuyas características se aprecian en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros del Circulador óptico 6015-3

Fuente [38]

Parámetro	Valor
Longitud de onda de operación	De 1525nm a 1610nm
Perdida de inserción máxima	1dB
Máximo nivel de potencia de entrada	27dBm

3.1.5 Selección del amplificador

Para poder tener una máxima sensibilidad y robustez frente al ruido, es necesario tener la máxima potencia de entrada a la fibra posible. Considerando los elementos, se puede evaluar, según la tabla 3.5, que el circulador presenta un nivel máximo de potencia de 27dBm antes de que se presenten efectos no lineales en la fibra. Adicionalmente, es importante considerar un margen de 3dB para poder proteger al circulador de cualquier inconveniente.

Como se indica en el láser, la potencia típica es de 40mW, por tanto, esto implica que se tengan 16dBm de potencia de transmisión al salir del láser. Por tanto, es posible amplificar la señal que ingresa a la fibra. La mayoría de los amplificadores ópticos son para levantar niveles de potencia por debajo de los 0dBm. En esta aplicación se necesita un amplificador *booster* los cuales se caracterizan por aumentar la potencia de una señal que presenta un buen nivel de potencia.

Para ese propósito, se utilizaría un EDFA100S, el cual permite llevar la señal hasta un nivel de potencia máximo de 23dBm con una señal de 10dBm tal como se observa en la tabla 3.6. Por tanto, se utilizaría un atenuador de 6dB y este amplificador para generar que la potencia de transmisión en la fibra se de 23dBm.

Tabla 3.6 Parámetros del EDFA

Fuente [39]

Parámetro	Valor
Longitud de onda de operación	1530nm a 1565nm
Máxima potencia de salida	23dBm
Máxima potencia de entrada	10dBm
Figura de ruido	<5dB

3.1.6. Selección del fotorreceptor

Para el fotorreceptor es importante considerar un fotorreceptor avalancha. Esto es debido a que estos tipos de receptores se especializan en capturar señales de muy baja potencia. Estos receptores se caracterizan por tener una ganancia M de potencia lo cual mejora la sensibilidad y aumenta la relación señal a ruido [40].

Para esta selección se decidió escoger el fotorreceptor APD430C/M, el cual permite tener una ganancia de hasta 20 veces la potencia ingresada y se adapta a la longitud de onda de 1550 nm, tal como se observan en los parámetros de la tabla 3.7.

Para calcular el que se genera por este receptor se debe multiplicar la densidad espectral del ruido (DEP) con el ancho de banda óptico (B). El ancho de banda óptico se calcula a partir del tiempo de repetición de los pulsos de luz (t_r) a partir de la fórmula 3.3.

$$B = \frac{1}{2t_r} \quad (3.3)$$

Tabla 3.7 Parámetros del fotorreceptor avalancha

Fuente [40]

Parámetro	Valor
Longitud de onda de operación	900nm a 1700nm
Ganancia máxima (M)	13dB
Ganancia mínima (M)	6dB
Densidad espectral del ruido (DEP)	0.45 pW/ \sqrt{Hz}
Ruido integrado	-47.7dBm

3.2. Diseño de la simulación

Una vez definidos los fundamentos del sistema DAS propuso una simulación en Matlab con el objetivo de demostrar el funcionamiento y la operación de éste. Esta simulación está basada en la arquitectura y los parámetros previamente descritos.

Por simplificación de análisis, se aproxima la fibra óptica como una guía de onda rectangular. Esta aproximación no afecta el fenómeno de DAS en sí, la principal

diferencia que trae es la potencia recibida la cual puede ser corregida por medio de un factor.

3.2.1. Definición de constantes

Antes de desarrollar la simulación se definieron en la tabla 3.8 las siguientes constantes para la simulación a partir de los elementos definidos en la arquitectura mostrada.

Tabla 3.8: Constantes utilizadas en la simulación

Símbolo	Parámetro	valor	Unidades
d	Distancia entre secciones de scattering centers	1	mm
L	Longitud de la fibra	1	km
sr	Resolución espacial	1	m
λ	Longitud de onda	1550	nm
E_0	Intensidad del campo eléctrico del láser	0.2	V/m
α	Atenuación en la fibra	46	$\mu np/m$
σ_n	Desviación estándar del ruido	55.68	μV
v_p	Velocidad de propagación en la fibra	$2.04 * 10^8$	m/s
D	Diámetro de la fibra	125	μm

3.2.2. Formación de los scattering centers

Para la formación de los scattering centers se tomó de referencia la ecuación 2.14. Para ello, según se muestra en la figura 3.4, se dividió la fibra en m secciones transversales. En cada una de ellas se considera que se tiene un scattering center el cual se encuentra en una posición aleatoria dentro de la sección. Se definió su posición por distribución uniforme tanto en el eje longitudinal (x) como en el transversal (y) tal como se puede apreciar en la figura 3.5. Para los límites de la distribución en el eje x se consideraron el inicio de la sección transversal y el fin de esta. Para el eje y se consideró como límite inferior el valor cero y como el valor máximo el diámetro de la fibra. En la figura 3.6 se puede apreciar cómo se distribuyen los scattering centers en una sección de 50mm.

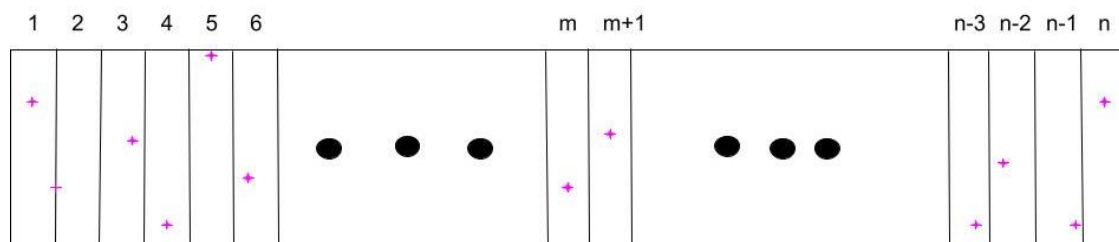


Figura 3.4: distribución simulada de los scattering centers

Fuente: [Elaboración propia]

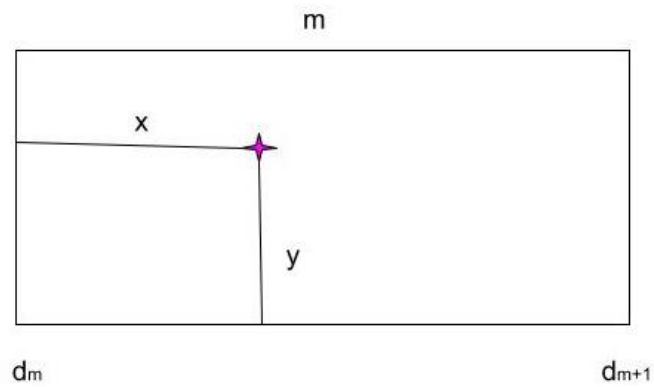


Figura 3.5: Posición del scattering center en una posición con x, y variables aleatorias uniformes

Fuente: [Elaboración propia]

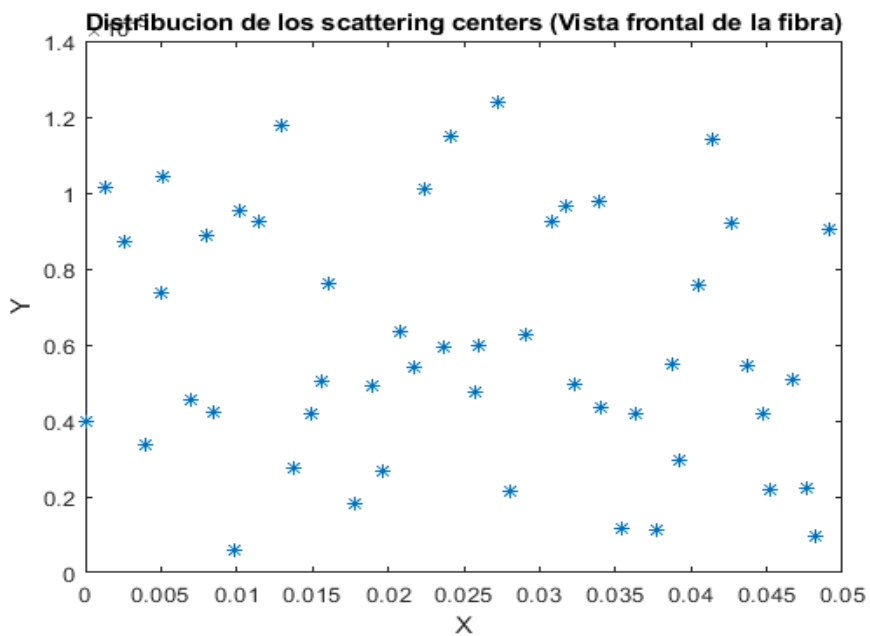


Figura 3.6 Distribución de los Scattering centers en una longitud de 50mm

Fuente: [Elaboración propia]

3.2.3. Coeficiente de reflexión de los scattering centers

Para el coeficiente de reflexión de los scattering centers, primero se definió aleatoriamente su índice de refracción siguiendo una distribución normal, cuyos parámetros se pueden apreciar en la tabla 3.9. La media se definió a partir de coeficiente de refracción de la fibra puesto que las anomalías van a oscilar respecto a este valor. Por otra parte, se definió la desviación estándar por medio de estimación.

Tabla 3.9: Parámetros del cálculo del coeficiente de reflexión de los scattering centers

Símbolo	Parámetro	valor	Unidades
n	Media del índice de refracción en la fibra	1.47	Adimensional
σ_i	Desviación estándar del índice de refracción	0.006	Adimensional

A partir de ello, se calculó el coeficiente de reflexión relativo a cada scattering center por medio de la ecuación 3.4. Este coeficiente de reflexión representa cuanta es la energía que dispersa un scattering center dado.

$$\Gamma = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (3.4)$$

3.2.4. Generación de la firma de interferencia

En primer lugar, se calcula el número de muestras del patrón que se van a obtener según la ecuación 3.5. En este caso según los parámetros de la tabla 3.8, la cantidad de muestras serían de 1000.

$$\text{muestras} = L * SR \quad (3.5)$$

En segundo lugar, como se explicó en el capítulo de la reflectometría en el dominio del tiempo, la luz que interactúa con un scattering centers es dispersada en múltiples direcciones. Por tanto, un scattering center genera múltiples caminos por donde la luz regresa a la fibra. Distintos caminos a la larga implican distintas distancias, por tanto, la fase entre estos caminos va a diferir. En una situación real, se tienen infinitos caminos por donde la luz llega a la fuente. En esta simulación se considerará un número finito de caminos para poder simular este efecto.

Para ello se definieron 10 secciones longitudinales donde la luz dispersada por el Raleigh scattering llega al receptor, según se muestra en la figura 3.7. Para cada sección se obtuvo su punto medio (Y_{sm}), el cual es el punto donde se calcula la distancia respectiva a la sección. Además, cabe resaltar que toda la longitud vertical corresponde al diámetro de la fibra.

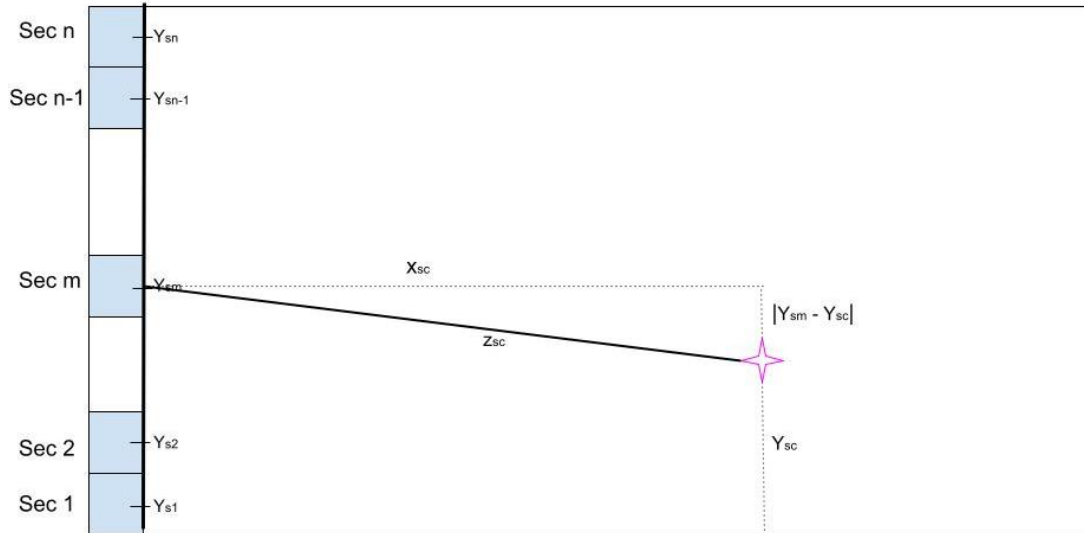


Figura 3.7: Secciones longitudinales de la fibra

Fuente: [Elaboración propia]

En tercer lugar, por cada punto que se encuentra en una resolución espacial dada se obtiene el campo eléctrico según la fórmula 2.15, donde en este caso, a_m es el módulo del coeficiente de reflexión calculado anteriormente para el scattering center m , n_1 es el índice de refracción del medio y z es una distancia de referencia correspondiente a un punto dentro de la resolución espacial a cada una de las secciones longitudinales. Adicionalmente, z_{sc}^m representa la distancia del scattering center a cada una de las secciones longitudinales, la cual se calcula a partir de la ecuación 3.5 y se aprecia en la figura 3.7. Por ende, se tendrá una interferencia causada por la suma compleja del campo eléctrico provenientes de todas las dispersiones producidas por los scattering centers en una distancia igual a la resolución espacial.

$$z_{sc}^m = \sqrt{x_{sc}^2 + |y_{sm} - y_{sc}|^2} \quad (3.5)$$

Por último, se calcula la potencia óptica a partir del cuadrado de la suma de las amplitudes de los campos eléctricos. Adicionalmente se le agrega un ruido gaussiano proveniente del receptor con potencia equivalente de ruido de 1.3nW. Cabe mencionar que, debido a la aproximación realizada de la fibra óptica como una guía de onda rectangular, la potencia esperada, la cual puede ser calculada en la ecuación 2.5, difiere de la obtenida. Por tanto, se aplica un factor de corrección para tener la correcta potencia óptica. Tras realizar lo descrito anteriormente se puede apreciar un patrón de interferencia similar al de la figura 3.8.

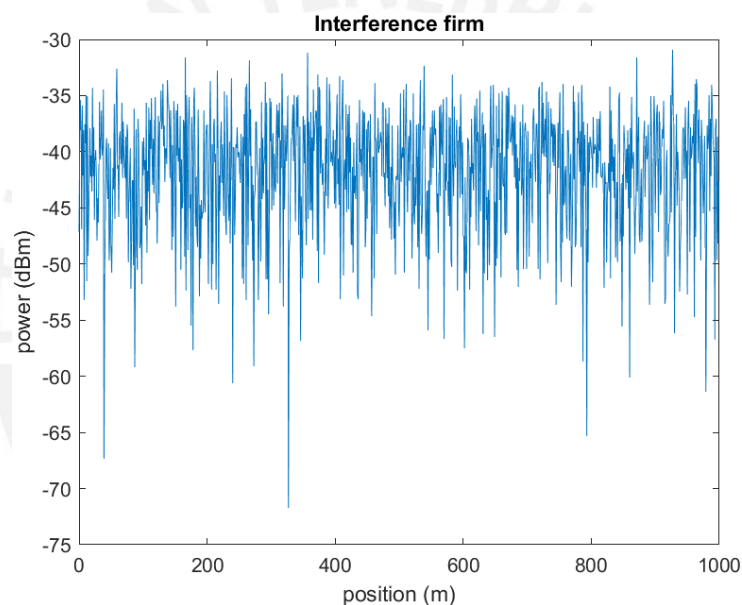


Figura 3.8: Firma de interferencia de la fibra

Fuente: [Elaboración propia]

3.2.5. Generación de la vibración

Como se explicó anteriormente la vibración es una onda de presión que interactúa con la fibra óptica. Esta vibración genera una deformación, la cual desplaza los scattering centers y modifica el índice de refracción en la zona.

Para simular la vibración, primero se calculó la presión máxima a partir de la ecuación 2.11. Utilizando los parámetros definidos en la tabla 3.10 se calculó que la máxima

presión es de 6.3Pa. A partir de este valor se definió la onda de presión en sí a partir de la ecuación 2.10, la cual se encuentra en **función del tiempo**.

Para poder simular el paso tiempo se creó un vector de tiempos el cual representa el instante donde se toma una muestra. La diferencia entre los tiempos es igual al tiempo t_r , el cual es el tiempo que se demora la luz en ir y regresar a lo largo de la fibra. Esto con el objetivo de evitar las interferencias producidas al tener dos pulsos de luz viajando en la fibra. Se aprecian los valores relacionados al vector de tiempo en la tabla 3.11.

A partir de esta onda de presión, para cada instante de tiempo, se calculó la deformación producida en la dirección de la vibración (eje radial) aplicando la ecuación 2.12. Una vez calculada la deformación radial, se calculó la deformación inducida en la dirección longitudinal de la fibra usando la ecuación 2.13. Las constantes relacionadas a la deformación se pueden apreciar en la tabla 3.11. Es importante mencionar que la deformación también resulta ser una función del tiempo y, al igual que la onda de presión, cuenta con 100 muestras para la simulación.

Tabla 3.10: Parámetros de la vibración

Símbolo	Nombre	valor	Unidades
A_v	Amplitud de la vibración	0.1	nm
f_v	Frecuencia de la vibración	10	kHz
ρ	Densidad de la fibra óptica	2520	kg/m^3
c	Velocidad de sonido en la fibra óptica	3980	m/s
x	Posición donde afecta la vibración en la fibra	100	m

Tabla 3.11: Parámetros temporales

Símbolo	Nombre	valor	Unidades
t_r	Tiempo de ida y vuelta (periodo de muestreo)	9.8	μs
n_p	Numero de patrones realizados (muestras)	100	Adimensional

Tabla 3.12: Parámetros de deformación

Símbolo	Nombre	valor	Unidades
σ_{rz}	Coefficiente de Poisson del eje radial (r) al longitudinal (z)	-0.17	Adimensional
Y	Módulo de Young en la fibra	$70 * 10^9$	$\frac{N}{m^2}$

3.2.6. Patrón con vibración

La deformación que se generó anteriormente genera cambios físicos en la fibra.

Por una parte, los scattering centers en la zona se desplazan debido a la deformación. La deformación en el eje radial y longitudinal se calculan a partir de la ecuación 2.12 y 2.13 respectivamente. Por lo explicado anteriormente y considerando la ecuación 3.7 (donde se muestra el desfase resultante de la ecuación 2.15), se tendrán distintas distancias (z_{sc}^m

varía) y por ende un distinto desfase. Este desfase involucra una interferencia distinta y por ende un valor distinto [41].

Por otra parte, una deformación implica una tensión. Esta tensión genera un cambio en el índice de refracción inversamente proporcional a esta cuyo valor se observa en la tabla 3.13. Un cambio en el índice de refracción impacta en la constante de propagación de la onda viajera (β), lo cual, según la ecuación 3.7, modifica la velocidad de fase. Esto genera que para una misma distancia respecto a un scattering center se obtenga una distinta fase. Por tanto, distintas fases generan distintas interferencias y por ende un patrón diferente en la zona.

$$\Delta\varphi = (z_{sc}^m - z) * \frac{4\pi n}{\lambda_0} \quad (3.7)$$

Cabe resaltar que, como se está tomando un punto de referencia dentro de la resolución espacial, el desfase generado por el cambio del índice de refracción solo afecta a los puntos dentro de esa resolución espacial. Esto es debido a que los puntos que se encuentran en las resoluciones anteriores no se ven afectados por ese desfase y todos los puntos que se encuentran en una resolución espacial superior se ven igualmente afectados por este cambio, por lo que el desfase sería el mismo [41].

Por tanto, para cada instante de tiempo, se calculó el índice de refracción en las zonas afectadas por la vibración y el desplazamiento radial y longitudinal generado por la deformación. A partir de ello, por cada muestra, se genera un nuevo patrón utilizando la misma función con la que originalmente se generó la firma de interferencia (el patrón sin presencia de vibración). En la figura 3.9 se aprecia una de las muestras del patrón con vibración en contraste a la firma de interferencia.

Tabla 3.13: Parámetros para generar el patrón con vibración

Símbolo	Nombre	valor	Unidades
ρ	Variación del índice de refracción con la tensión	-0.212	$1/\varepsilon$

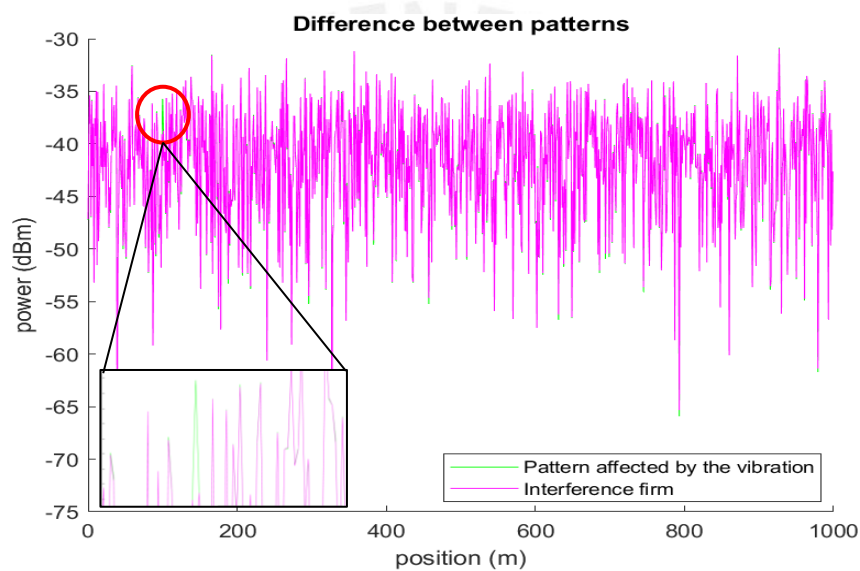


Figura 3.9: Diferencia de patrones con y sin vibración

Fuente: [Elaboración propia]

En la figura 3.9 se logra apreciar el evento en un instante de tiempo. Sin embargo, como las ondas mecánicas tienen amplitud variable se pueden tener instantes de tiempo en los que no se puede detectar fácilmente el evento. Por ende, se realiza un procesamiento de la señal para identificar el evento con claridad el cual se detalla a continuación.

3.2.7. Detección del evento

Teniendo los n_p patrones generados en el punto anterior, se puede detectar el evento de la misma forma que se detalló en el capítulo 2.1.6. En primer lugar, se sabe que, en un solo patrón, la señal recibida es una superposición de tres tipos de señales: La firma de interferencia, la variación de la señal por la vibración y el ruido.

La firma de interferencia en ausencia de ruido y de una vibración se sabe que es constante para todo instante de tiempo. Por otra parte, se sabe que la vibración actúa sobre un punto específico de la fibra (o puntos discretos) mientras que el ruido está presente en todos los puntos de la resolución espacial. Por ende, siempre y cuando la varianza del ruido sea mucho menor a la varianza de la señal generada por la vibración, se puede llegar a identificar la posición que ocurre el evento.

Para ello, primero en cada patrón generado se resta la firma de interferencia, de esta forma solo se trabajan con las señales del ruido y de la del evento. En segundo lugar, como ambas señales son aleatorias de media cero, se procede a calcular por cada punto de la resolución espacial el valor de raíz media cuadrada (RMS) entre los n_p patrones. De esta manera se obtiene aproximadamente la varianza de las señales. De esa forma, mientras la varianza de la señal sea mucho mayor al ruido se podrá identificar el evento sin problemas.

Para poder identificar el evento cuantitativamente, se define un umbral el cual corresponde a 10 veces la media de los valores RMS. De esa manera, como se observa en la figura 3.10, cualquier señal que sobrepase el umbral será catalogado como evento y se procederá a hacer la identificación de la frecuencia de vibración.

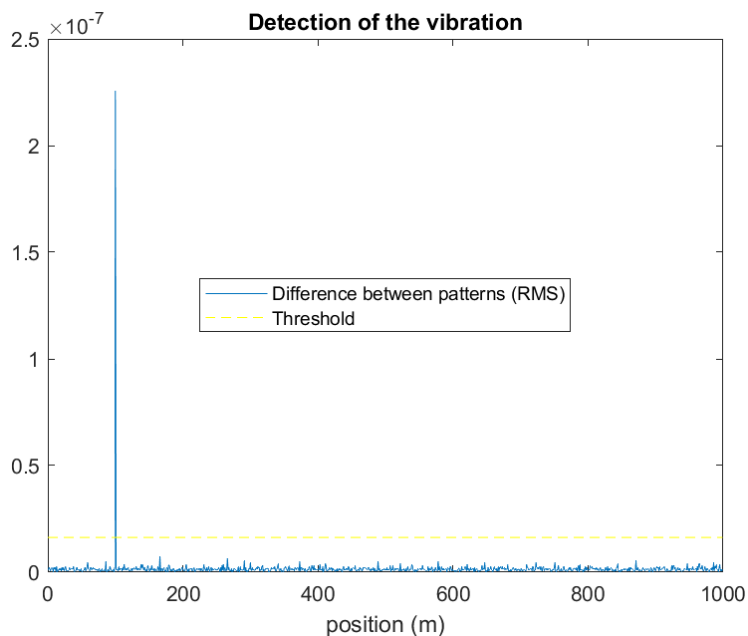


Figura 3.10: Detección del evento

Fuente: [Elaboración propia]

3.2.8. Detectar frecuencia

Una vez detectado el evento se puede identificar la variación de la intensidad recibida a través de los distintos patrones, los cuales corresponden a instantes de tiempo con un periodo de t_r . Por tanto, al igual que se explicó en la sección 2.1.6 la frecuencia máxima que se puede detectar es de $1/2t_r$ según la ley de Nyquist.

De esta forma se procedió a formar el vector correspondiente a la variación de la intensidad de luz en la posición identificada en función del tiempo, el cual se muestra en la imagen 3.11. Para remover cualquier componente DC en la señal, se le resto su media.

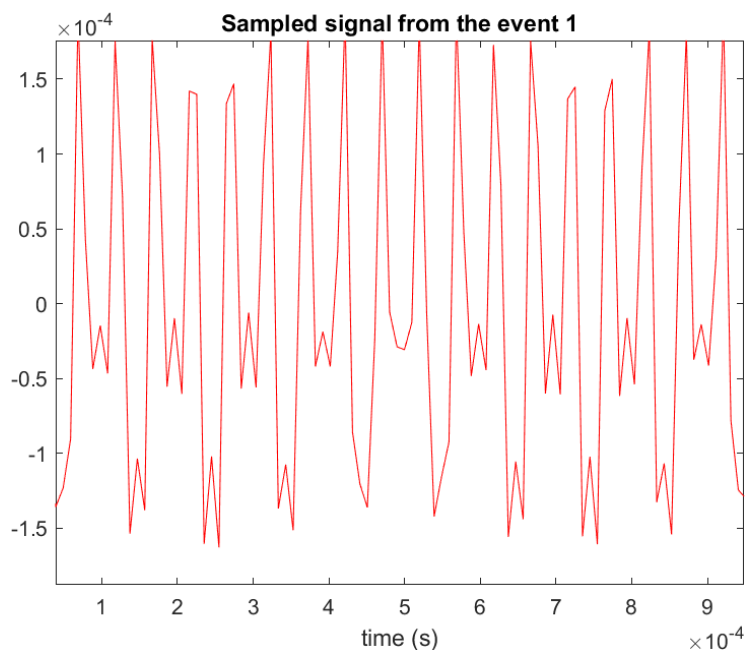


Figura 3.11: Variación de la intensidad del back scattering con respecto al tiempo en el evento

Fuente: [Elaboración propia]

Por último, se calculó la transformada de Fourier para poder obtener las componentes frecuenciales de esta señal, tal como se puede apreciar en la figura 3.12. Como se aprecia, no solo se encuentra la frecuencia de la señal, sino también sus armónicos y picos residuales de otras frecuencias correspondiente al ruido. Por tanto, primero se definió un umbral cuyo objetivo es descartar las frecuencias de baja densidad espectral proveniente del ruido. Este umbral corresponde a la media debido a que se tiene un buen número de componentes espectrales de alta DEP. Después, dentro de las frecuencias restantes, se escogió la frecuencia menor, pues corresponde a la frecuencia fundamental. De esta forma se llega a obtener la frecuencia de la señal.

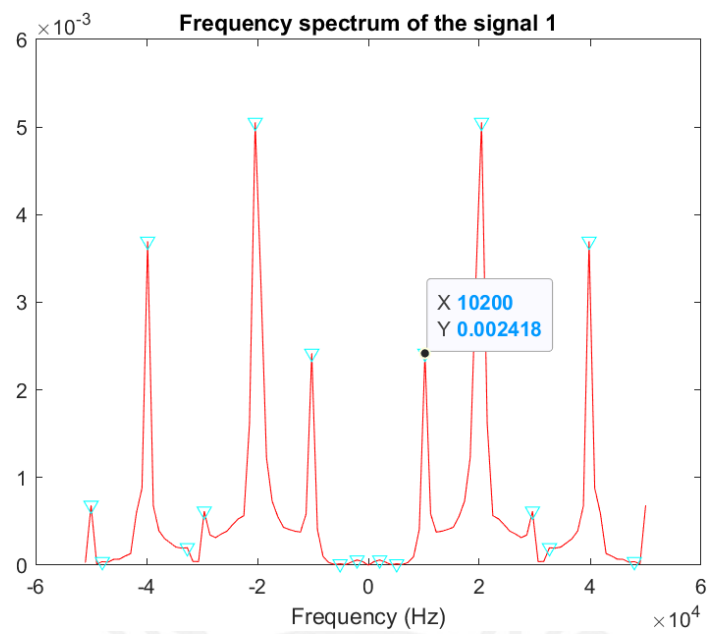
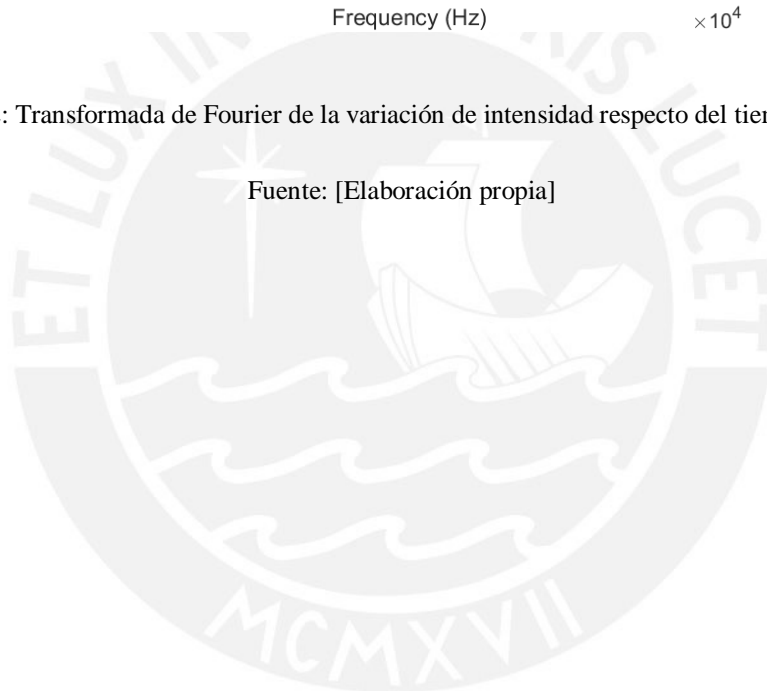


Figura 3.12: Transformada de Fourier de la variación de intensidad respecto del tiempo del evento

Fuente: [Elaboración propia]



Capítulo 4

Análisis del sistema propuesto

4.1 Evaluación del diseño

4.1.1. Longitud máxima de evaluación de la fibra

Como se mencionó anteriormente, la máxima longitud de la fibra en la cual se puede detectar un evento está limitada por el menor dos factores. Por una parte, se encuentra limitada por la coherencia de la luz, debido a que una vez que se pierda la coherencia, se pierde el patrón producido por las deformaciones en la fibra. Por otra parte, en caso la potencia equivalente del ruido (NEP) sea mayor o igual a la potencia de la señal, esta se pierde. Por tanto, a continuación, se presentan los cálculos de las siguientes limitantes.

Como se aprecia en la tabla 3.1, en la sección de selección del láser, al tener un ancho de haz medio de 50kHz (0.4fm de longitud de onda) y llegando a emitir a un pulso gaussiano, se puede calcular, aplicando la ecuación 2.3 y 2.4, la longitud máxima de coherencia, la cual se calcula según lo mostrado en la ecuación 4.1.

$$\tau_c = \frac{\sqrt{8\pi \ln(2)}}{2\pi * 50k} = 13.28\mu s$$

$$lc = \frac{3 * 10^8}{1.47} * 13.28 * 10^{-6} = 2.710km \quad (4.1)$$

Por tanto, a partir de la ecuación 4.1, como el pulso que se emite tiene un recorrido de ida y vuelta, entonces la distancia máxima es la mitad de la distancia de coherencia. Por tanto, utilizando este láser se pueden detectar eventos de hasta 1.35km de distancia, tal como se aprecia en la ecuación 4.2.

$$z_{max} = lc/2 = 1.35km \quad (4.2)$$

Por otra parte, a partir de lo mostrado en la tabla 3.4 perteneciente a la sección de la fibra óptica y según las ecuaciones 2.5 y 2.6 para una potencia P_{tx} dada, se calcula siguiendo las ecuaciones 4.3 y 4.4.

$$P_B(z) = P_{tx} * 10n * 9.37 * e^{-2*46u*z}$$

$$P_{B(dBm)}(z) = P_{tx(dBm)} - 70.28 - 0.4z \quad (4.3)$$

$$P_{B(dBm)}(0) = P_{tx(dBm)} - 70.28 \quad (4.4)$$

Donde, el $P_{tx(dBm)}$ corresponde a la potencia que entra en la fibra en dBm, la cual se puede aproximar a la potencia que sale del amplificador, la cual, según la tabla 3.6, Es igual a $23dBm$. Además z se encuentra en kilómetros. Adicionalmente, en la ecuación 4.5 se aprecia la potencia final que le llega al receptor en función de z considerando la

propia ganancia de este de 13dB que se aprecia en la tabla 3.7. También se calcula en la ecuación 4.6 el NEP generado en el receptor tomando como el ancho de banda del pulso. En este caso, como se buscó una resolución espacial de 1m con un periodo de repetición (t_r) de $10\mu s$ según la ecuación 3.3 el ancho de banda considerado es de 50MHz.

$$P_{B(dBm)}(z) = -34.3 - 0.4z \quad (4.5)$$

$$NEP = 0.45p * \sqrt{50M} = 3.1nW$$

$$NEP_{(dBm)} = -55.09 \text{ dBm} \quad (4.6)$$

Por tanto, a partir de las ecuaciones 4.5 y 4.6 se calcula la distancia máxima según la potencia en la ecuación 4.6 y la ecuación 2.9.

$$P_{B(dBm)}(z_{max}) - NEP_{(dBm)} = 0$$

$$z_{max} = 51.75 \text{ km} \quad (4.7)$$

Por lo tanto, según los elementos usados, se puede concluir que, a partir de la ecuación 4.2 y 4.7, el sistema está limitado por la coherencia del láser a una distancia máxima de fibra de 1.35km.

Para solucionar esta limitante se pueden utilizar láseres con menor ancho de haz, lo cual mejoraría la coherencia de la luz.

4.1.2. Amplitud y frecuencia mínima a la que se detecta el evento

Tanto la amplitud, como la frecuencia mínima para el cual se logra detectar el evento dependen de la ecuación 2.11, la cual especifica que la presión ejercida por la vibración es directamente proporcional al producto de la amplitud y la frecuencia de la onda mecánica. La presión genera una deformación y esta última desplaza los scattering centers

de forma que se forman los distintos patrones. Sin embargo, caso se tenga una presión muy baja, la deformación puede llegar a ser despreciable influyendo en que no se tenga ninguna diferencia en el patrón. Como tanto la amplitud, como la frecuencia son variables del sistema, la evaluación se realiza por medio del producto $A_v f_v$.

Se sabe que, para poder detectar cualquier evento a lo largo de la fibra, la interferencia causada por este evento debe producir un cambio en el valor de la intensidad luminosa en ese punto a través del tiempo. Sin embargo, para que se produzca una interferencia, el desplazamiento de los scattering centers deben estar, por lo menos, en el orden de un cuarto de la longitud de onda de la luz emitida. Esto se demuestra a partir de que un desfase entre dos caminos de $\lambda/4$ implica una máxima diferencia de la mitad de la potencia respecto a una interferencia constructiva (los dos caminos en fase). Desplazamientos en ordenes menores a los de esta longitud involucran cambios de intensidad luminosa que a medida que aumenta el ruido pueden llegar a ser despreciables.

En este caso, al trabajar con una longitud de onda de 1550nm, el orden debería ser mayor o igual a 10^7 para garantizar robustez frente al ruido. Aplicando las ecuaciones 2.12 y 2.13 se obtiene que la presión óptima para cumplir con esa finalidad debería ser mayor a 2Pa. Sin embargo, cabe resaltar que presiones menores pueden ser detectadas a bajo nivel de ruido.

Hay que hacer un énfasis en que si la deformación que se ejerce a la fibra es muy fuerte resultado en deformaciones que superen el orden del doble de la longitud de onda (10^5) no se podrá detectar la frecuencia del evento. Esto por el hecho que se tiene una diferencia de longitud muy grande entre dos instantes de tiempo. Esto pierde la linealidad del desfase calculado en la ecuación 3.7 y por ende la potencia óptica recibida será aleatoria. De esta forma no se puede detectar la frecuencia.

Por tanto, para poder detectar efectivamente la frecuencia, la deformación inducida debe estar en el orden de la longitud de onda aproximadamente,

4.1.3. Frecuencia máxima detectada

Respecto a la máxima frecuencia que puede llegar a ser detectada, como se explicó en el capítulo 2, se encuentra limitada por el teorema de Nyquist. Esta indica que la máxima frecuencia que se puede reconocer es la mitad de la frecuencia de muestreo.

Como nuestro tiempo de muestreo para una longitud de 1.35km es de $13.2\mu s$ entonces la máxima frecuencia que se puede detectar es de 37.8kHz.

4.1.4. Frecuencia mínima detectada

La frecuencia mínima que se puede detectar no depende en sí del sistema, sino en la cantidad de patrones afectados por la vibración que se obtienen, es decir, mientras más tiempo se capture la información, menor es la frecuencia que puede llegar a ser detectada.

El periodo máximo de una señal que se puede capturar es de $n * t_r$ siendo $t_r = 13.2\mu s$ el tiempo de muestreo de un patrón para la longitud de 1.35km y n igual al número de patrones de patrones realizados. Para periodos mayores, no se ha recurrido el suficiente tiempo para completar su ciclo y por ende no se identifica el evento. Teniendo el periodo máximo, la frecuencia mínima obtenible es igual a la inversa de este periodo tal como se muestra en la ecuación 4.8.

$$f_{min} = \frac{1}{T_{max}} = \frac{75.6k}{n} \quad (4.8)$$

Para un n igual a 100 como en la simulación, la frecuencia mínima detectable es de 756Hz.

4.2. Análisis económico:

4.2.1. Costo de equipos:

Los equipos utilizados se muestran en el capítulo 3.1. En este capítulo se expondrá el coste de cada uno según se muestra en la tabla 4.1. En la fibra se consideró una distancia total de 2km considerando las posibles fallas al momento de la instalación.

En total se calcula que el coste total de los equipos sería de unos 13230.5 dólares estadounidenses.

Tabla 4.1: Coste de equipos

Equipo	Nombre completo	Fabricante	Precio (\$)
Láser [33]	Butterfly External Cavity Laser	Thorlabs	2777.80
Modulador [35]	LN81S-FC - 10 GHz Intensity Modulator	Thorlabs	2535.55
Fibra óptica [37]	fibra Corning SMF-28e+	Corning	360.00 (0.18\$/m)
Circulador óptico [38]	6015-3-APC - Fiber Optic Circulator	Thorlabs	717.45
Amplificador [39]	EDFA100S - Erbium-Doped Fiber Amplifier, Single Mode	Thorlabs	4349.69
Fotorreceptor [40]	APD430C/M - InGaAs Variable-Gain Avalanche Photodetector	Thorlabs	2489.95

4.2.2. Costo de operación y mantenimiento

Como este es un desarrollo novedoso, no se puede definir un costo de operación y mantenimiento fijo, debido a que no se tienen estándares definidos ni casos calculados anteriormente.

4.3. Aportes de la tesis

4.3.1. Aportes en el ámbito ambiental

La implementación de este sistema permitiría detectar las posibles rupturas en las tuberías en las estructuras petroleras. De esta manera, se reduce la probabilidad de una posible fuga. Al reducir la probabilidad de error, se reduce el promedio de fugas en un periodo de tiempo. Al tener menos fugas, menos petróleo se escapa al océano y por ende se reducen las ocurrencias descritas en el capítulo 1.3.1, tal como el aumento de la acidez del mar o la pérdida de especies marinas por la toxicidad del petróleo.

4.3.2. Aportes los ámbitos: social, salud y bienestar

Al tener un sistema que garantice la seguridad de las estructuras petroleras respecto a la probabilidad de fuga, se reduciría el miedo por parte de los pobladores de la extracción del petróleo en sus tierras. Esto se debe a que su entorno estará más seguro y por ende no se generarían los problemas de salud descritos en el capítulo 1.3.2. Adicionalmente, al tener menos pérdidas de petróleo, la sustancia extra extraída puede ser utilizada para más aplicaciones que benefician a la sociedad.

4.3.3. Aportes en el ámbito económico y global

Con respecto al ámbito económico, al conseguirse una reducción en la cantidad promedio de fugas en un periodo de tiempo, se consigue un aumento en la cantidad de sustancia obtenida, lo que se traduce en un aumento en las ventas. Ese aumento en las ventas genera un mayor ingreso al país y una mayor cantidad de petróleo disponible alrededor del mundo, lo cual representa un aporte global.

Adicionalmente, se evitan los gastos relacionados a las multas que involucraría un derrame de petróleo en el mar y las pérdidas implicadas por la reducción del turismo y la parálisis de los negocios en el área de la zona afectada.

4.3.4. Aportes en el ámbito cultural

Esta tesis no tiene un aporte en el ámbito cultural.



Conclusiones

En el transcurso de la tesis, se llegó a modelar y simular un sistema acústico distribuido (DAS) con fibra óptica. Se demostró que este sistema es capaz de detectar vibraciones a lo largo de toda la longitud de la fibra e identificar su frecuencia.

Los sensores DAS son adaptables; Estos pueden variar su resolución o su sensibilidad a partir del ancho del pulso de luz. Pulsos más anchos implican mayor energía que ingresa al sistema y por ende mayor potencia recibida por lo que mejora la sensibilidad. Sin embargo, pulsos más grandes implican una peor resolución espacial.

Además, la máxima distancia que se puede detectar puede estar limitado por la coherencia del láser o por el OSNR (relación señal a ruido). Los láseres más coherentes permiten llegar a mayores distancias, pero suelen ser menos económicos. En el caso del OSNR, este solo puede ser reducido ingresando mayor energía a la fibra o con materiales y condiciones que reduzcan el ruido del sistema.

Adicionalmente la frecuencia solo puede ser detectada si las deformaciones inducidas por la presión están en el orden de la longitud de onda. Deformaciones menores impiden la detección del evento y deformaciones mayores generan un comportamiento aleatorio en la intensidad recibida que impide seguir con el patrón de la vibración.

La máxima frecuencia que se puede detectar está limitada por el teorema de Nyquist el cual es la mitad de la frecuencia de muestreo. La frecuencia de muestreo está limitada por la longitud de la fibra debido a que se tiene que esperar que un pulso emitido termine su recorrido. Por otra parte, no hay límite teórico para detectar la frecuencia mínima. Sin embargo, hay que, para detectar una frecuencia, se tiene que muestrear mínimamente un periodo de esta.

Específicamente para esta simulación se llegó a detectar una vibración de 10kHz a una distancia de 100m. El sistema permitía detectar frecuencias de hasta 37.8kHz a una máxima distancia de 1.35km con una resolución espacial de 1m. Estos valores pueden ser mejorados con una fibra más corta, un láser de mayor coherencia (menor ancho de haz) y pulsos más angostos.

Por último, se determinó en esta tesis que la resolución, la máxima frecuencia y la distancia de sensado pueden ser controlados por el ajuste de los parámetros que fueron vistos a lo largo de este trabajo.



Bibliografía

- [1] A. B. Larco, Análisis comparativo de los sensores fibra óptica Raman y Bragg para el internet de las cosas, Lima, 2020.
- [2] M. Garside, “Oil spills annual averages per decade worldwide 2019 | Statista.” <https://www-statista-com.ezproxybib.pucp.edu.pe/statistics/671539/average-number-of-oil-spills-per-decade/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [3] Statista Research Department, “Major threats to biodiversity 2015 Italy | Statista.” <https://www-statista-com.ezproxybib.pucp.edu.pe/statistics/611292/major-threats-to-biodiversity-italy-survey/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [4] Office of Response and Restoration, “The Toxicity of Oil: What’s the Big Deal? | response.restoration.noaa.gov.” <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/toxicity-oil-whats-big-deal.html> (accessed Nov. 30, 2020).
- [5] L. West, “5 Environmental Consequences of Oil Spills.” <https://www.treehugger.com/environmental-consequences-of-oil-spills-1204088> (accessed Nov. 30, 2020).
- [6] J. Flanagan, “Dead dolphins wash up on Mauritius beaches after Wakashio oil spill | World | The Times.” <https://www.thetimes.co.uk/article/dead-dolphins-wash-up-on-mauritius-beaches-after-wakashio-oil-spill-lwkg3k2rf> (accessed Nov. 30, 2020).
- [7] OXFAM, “Los 7 problemas del medio ambiente más graves | Ingredientes que Suman.” <https://blog.oxfamintermon.org/los-7-problemas-del-medio-ambiente-mas-graves/> (accessed Nov. 30, 2020).

- [8] Carmona Ernesto, “Las 25 noticias más censuradas: El aumento de la acidificación de los océanos | Cubadebate.”
<http://www.cubadebate.cu/especiales/2014/10/25/las-25-noticias-mas-censuradas-el-aumento-de-la-acidificacion-de-los-oceanos/#.X8V7DM1KjIW>
(accessed Nov. 30, 2020).
- [9] Naciones Unidas México, “ONU México » Las personas y los océanos.”
<https://www.onu.org.mx/las-personas-y-los-oceanos/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [10] ITOPF, “Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el sector de la pesca y acuicultura. Documento de información técnica.” 2011.
- [11] Greepeace, “Efectos del petróleo sobre la salud,” vol. 3, 2017.
- [12] J. L. Ramseur, “CRS Report for Congress Deepwater Horizon Oil Spill: The Fate of the Oil,” pp. 1–20, 2010.
- [13] Statista Research Department, “BP: costs of oil spill 2013 | Statista.”
<https://www-statista-com.ezproxybib.pucp.edu.pe/statistics/269451/bp-costs-of-oil-spill-since-2010/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [14] M. Yarlequé, “Comunicaciones Ópticas.” pp. 1–12, 2019.
- [15] UDLAP, “Coherencia Y Espectro Óptico”.
- [16] FCenRed, “Luz coherente y luz caótica – Física cuántica en la red.”
<http://www.fisicacuantica.es/luz-coherente-y-luz-caotica/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [17] S. Castro, “Fibra óptica y las voces de la región - El Vigía.”
<https://www.elvigia.net/c-t/2014/5/17/fibra-ptica-voces-regin-158481.html>
(accessed Nov. 30, 2020).
- [18] BLACK BOX, “Cable de fibra óptica multimodo vs. monomodo.”
<https://www.blackbox.com.mx/mx-mx/page/28535/Recursos/Technical/black->

- box-explica/Fibre-Optic-Cable/Cable-de-fibra-optica-multimodo-vs-monomodo
(accessed Nov. 30, 2020).
- [19] J. SENIOR, *Optical Fibre Communications Principles and Practice*, 3rd ed. 2009.
- [20] Electrical Theorems, “OTDR - Optical Time Domain Reflectometer | ELECTRICAL THEOREMS.”
<http://electricaltheorems.blogspot.com/2015/09/otdr-optical-time-domain-reflectometer.html> (accessed Nov. 30, 2020).
- [21] G. Junyet and J. Comellas, “Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)”.
- [22] Y. Muanenda, “Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry,” *Journal of Sensors*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/3897873.
- [23] T. Freegarde, “Longitudinal waves,” *Introduction to the Physics of Waves*, pp. 125–133, 2012, doi: 10.1017/cbo9781139048149.011.
- [24] W. Johnson, “Elasticidad,” *La postura de la meditación*, pp. 81–106, 2019, doi: 10.2307/j.ctvt9jzwn.8.
- [25] G. Junyet and J. Comellas, “Distributed Acoustic Sensing (DAS)”.
- [26] A. Hartog, “An introduction to distributed optical fibre sensors,” no. 2017, pp. 231–278, 2020.
- [27] P. Zhu, H. Wen, Q. Che, X. Li, and X. Liu, “Disturbed PD Detection System Based on Improved ϕ -OTDR Assisted by wFBG Array,” *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks, ICOCN 2019*, pp. 2019–2021, 2019, doi: 10.1109/ICOCN.2019.8934677.

- [28] H. Gabai and A. Eyal, "How to specify and measure sensitivity in Distributed Acoustic Sensing (DAS)?," *25th International Conference on Optical Fiber Sensors*, vol. 10323, p. 103238A, 2017, doi: 10.1117/12.2265527.
- [29] K. Hicke and K. Krebber, "Towards Efficient Real-Time Submarine Power Cable," pp. 3–6.
- [30] K. Hicke, M.-T. Hussels, R. Eisermann, S. Chruscicki, and K. Krebber, "Condition monitoring of industrial infrastructures using distributed fibre optic acoustic sensors," *25th International Conference on Optical Fiber Sensors*, vol. 10323, p. 103230J, 2017, doi: 10.1117/12.2272463.
- [31] H. Wu *et al.*, "One-Dimensional CNN-Based Intelligent Recognition of Vibrations in Pipeline Monitoring With DAS," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 17, pp. 4359–4366, 2019, doi: 10.1109/jlt.2019.2923839.
- [32] Z. Wang *et al.*, "Distributed Acoustic Sensing Based on Pulse-Coding Phase-Sensitive OTDR," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 6117–6124, 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2869474.
- [33] ThorLabs, "Thorlabs - SFL1550S 1550 nm, 40 mW, Butterfly External Cavity Laser, SM Fiber, FC/APC." <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SFL1550S> (accessed Dec. 10, 2020).
- [34] H. Rosas, "Optical Transceiver," *Computer Science and Communications Dictionary*, pp. 1189–1189, 2000, doi: 10.1007/1-4020-0613-6_13169.
- [35] ThorLabas, "Lithium Niobate Electro-Optic Modulators, Fiber-Coupled." https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918&pn=LN81 S-FC (accessed Dec. 16, 2020).

- [36] ThorLabs, “Benchtop High-Speed LiNbO₃ Electro-Optic Modulator Drivers.”
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9949&pn=MX10A#ad-image-0 (accessed Dec. 16, 2020).
- [37] Corning, “Corning ® SMF-28e +® Optical Fiber,” no. July 2014, 2019.
- [38] Thorlabs, “Single Mode Fiber Optic Circulators.”
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=373&pn=6015-3-APC (accessed Dec. 10, 2020).
- [39] ThorLabs, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA).”
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10680&pn=EDFA100S (accessed Dec. 17, 2020).
- [40] ThorLabs, “InGaAs Avalanche Photodetectors.”
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4047&pn=APD430C/M (accessed Dec. 17, 2020).
- [41] W. A. Martins *et al.*, “Communication Models for Distributed Acoustic Sensing for Telemetry,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 15, pp. 4677–4688, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2714023.