



Universidad
Carlos III de Madrid

Tesis Doctoral

Sistema de instrumentación multicanal con
interferómetro heterodino de fibra óptica.
Aplicación a la detección y localización de
emisiones acústicas de ultrasonidos
procedentes de descargas parciales.

*Multichannel instrumentation system with optical fiber
heterodyne interferometer. Application to the detection and
localization of ultrasound acoustic emissions generated by
partial discharges.*

Autor: Julio Enrique Posada Román

Director: José A. García Souto

Departamento de Tecnología Electrónica

Leganés, 2015

TESIS DOCTORAL

Título:

Sistema de instrumentación multicanal con interferómetro heterodino de fibra óptica. Aplicación a la detección y localización de emisiones acústicas de ultrasonidos procedentes de descargas parciales.

Autor: Julio Enrique Posada Román

Director: José Antonio García Souto

Tribunal

Firma

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, _____ de _____ de 2015

Agradecimientos

Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer a todas las personas que de una u otra forma han contribuido al desarrollo de esta tesis doctoral.

De forma muy especial quiero agradecer a José A. García Souto, quien con sus enseñanzas y paciencia ha dirigido esta investigación hasta buen término. Para mí no solo has sido el mejor director de tesis que he podido tener, sino también un gran amigo.

A todos mis compañeros del Departamento de Tecnología Electrónica, por recorrer conmigo este camino ofreciéndome siempre su ayuda incondicional y por permitirme entrar en sus vidas durante estos años

I wish to acknowledge Prof. José Luis Santos for his advice during my research stay at INESC - Porto. The gathered knowledge in that period turned essential for my training as a researcher.

Special thanks to Prof. David A Jackson for his advice during the last stage of this research. It has been a very enriching experience to work with you during the Chair of Excellence period at University Carlos III de Madrid and also in my research stay at University of Kent.

A mi familia por haberme apoyado siempre. Sin su ayuda durante todos estos años, estos logros no habrían sido posibles.

Resumen

La monitorización en línea de los transformadores resulta imprescindible para garantizar su funcionamiento seguro y estable. Para este propósito, uno de los métodos más fiables es la observación de la actividad de descargas parciales. Éstas son un tipo de descargas producidas por rupturas localizadas en el aislamiento eléctrico que lo cortocircuitan parcialmente. Su actividad está involucrada en el proceso de degradación del sistema de aislamiento y proporciona información acerca del estado interno de los transformadores, la cual se utiliza para su mantenimiento predictivo y diagnóstico. Las descargas parciales generan emisiones de ultrasonidos que se utilizan para medir su actividad mediante técnicas acústicas. De este modo, un fallo en el aislamiento se manifiesta como una fuente de emisión acústica. La monitorización acústica de descargas parciales no sólo detecta la actividad, sino que además aprovecha este comportamiento para localizar los fallos, siempre y cuando se utilicen varios sensores espacialmente distribuidos. Para ello es imprescindible disponer de sistemas de instrumentación multicanal capaces de obtener medidas de los tiempos de llegada de las señales acústicas a los múltiples sensores y de utilizarlas en un algoritmo de localización para encontrar las posiciones de las fuentes de emisión acústica.

La monitorización acústica de descargas parciales se realiza normalmente con sensores piezoeléctricos colocados en las paredes del tanque del transformador. Sin embargo, este método presenta inconvenientes derivados de que la instalación de los sensores en el exterior: las señales detectadas son débiles y están distorsionadas. Además, se producen múltiples caminos de llegada de las señales acústicas a los sensores y reflexiones en las paredes del tanque, lo cual dificulta la localización de descargas parciales. Con el fin de evitar estos inconvenientes, en la última década se han propuesto nuevos sensores que pueden instalarse en el interior del tanque del transformador. Estos sensores emplean tecnología de fibra óptica para poder soportar las condiciones que se presentan en dicho entorno. Se han propuesto varios tipos: sensores basados en cavidades Fabry-Perot, sensores interferométricos de fibra óptica y sensores basados en redes de Bragg en fibra. Con el desarrollo de estos sensores internos de fibra óptica también se ha despertado un interés creciente en investigar nuevos sistemas de instrumentación multicanal para detectar y localizar las descargas parciales con sensores de fibra óptica.

Esta tesis está dedicada a ambos temas. El primer aporte principal es el diseño y desarrollo de un sistema de instrumentación interferométrico multicanal para la monitorización acústica de descargas parciales y su localización usando sensores de fibra

óptica. El diseño del sistema multicanal está basado en un interferómetro heterodino de fibra óptica siguiendo un esquema de Mach-Zehnder con múltiples brazos de medida en paralelo y un brazo de referencia común. Este sistema interferométrico multiplexado se ha demostrado con una implementación de cuatro canales en la que se obtiene muy alta resolución en la medida de presión acústica de ultrasonidos (1 Pa @ 150 kHz). También se ha demostrado experimentalmente la capacidad que tiene para localizar las fuentes de emisión acústica por medio de la medida simultánea con varios sensores. Adicionalmente, en estos experimentos de localización se ha añadido ruido sintético a la medida de los tiempos de llegada con el fin de evaluar las prestaciones del sistema. En los resultados de localización se obtiene la posición de la fuente de emisión acústica con una desviación típica menor que 1 cm en cada uno de los ejes (~1% de la dimensión normalizada del tanque).

El segundo aporte principal es la investigación sobre una nueva sonda de fibra óptica y su desarrollo, la cual es capaz de medir descargas parciales acústicamente en el interior y es compatible con el sistema interferométrico multicanal. El diseño de la cabeza del sensor está basado en una bobina de fibra óptica compuesta por múltiples capas. Este diseño es compacto, robusto y de bajo coste. Se obtuvo una sensibilidad adecuada para la detección acústica de descargas parciales utilizando 17 m de fibra dispuestos en una bobina con 5 capas. La sonda de fibra óptica, junto con el interferómetro heterodino, tiene la capacidad de detectar las emisiones acústicas generadas por descargas parciales a 150 kHz con una resolución de 1 Pa dentro de un rango de 17 kPa. Se ha realizado una caracterización completa de la sonda de fibra óptica en una plataforma diseñada para ensayos acústicos de ultrasonido, en la cual se pueden reproducir emisiones acústicas con características similares a las generadas por las descargas parciales. También se ha caracterizado la sonda de fibra óptica en experimentos de alta tensión, en los cuales se han generado diversos tipos de descargas parciales en aceite de transformador y bajo diferentes condiciones. En estos experimentos se midió con la sonda en instalaciones eléctricas de alta tensión en AC, con descargas parciales internas y superficiales, y también en instalaciones eléctricas de alta tensión DC. Por lo tanto, se ha demostrado su efectividad para detectar descargas parciales en un rango amplio de condiciones. Es importante resaltar que en los experimentos de alta tensión se demostró por primera vez la detección acústica de descargas parciales internas con un sensor de fibra óptica.

Palabras clave: Sistema de instrumentación multicanal, interferómetro heterodino de fibra óptica, sensor interferométrico de fibra óptica, emisión acústica, ultrasonidos, descargas parciales.

Abstract

On-line monitoring of power transformers is essential to guarantee their stable and safe operation. Partial discharges monitoring is one of the reliable methods used for this purpose. Partial discharges are local electrical breakdowns that only partially break the insulation. Their activity is involved in the degradation process of the transformers and provides information about the internal conditions of the insulation system, which is used for the diagnosis of power transformers. Partial discharges generate ultrasound acoustic emissions that are used for the acoustic measurement of their activity. In other words, a fault in the insulation behaves as a localized acoustic emission source. The acoustic monitoring of partial discharges exploits this characteristic in order to localize faults in the insulation system. The localization of partial discharges is only possible using a multichannel system able to obtain the times of arrival of the acoustic signals at the multiple sensors and use them in a computational localization algorithm.

The conventional acoustic monitoring of partial discharges is done with piezoelectric sensors mounted on the transformer tank walls. However, the method suffers from some problems due to the external installation of the sensors. The detected signals are weak and distorted. There are multiple paths to the sensors and reflections at the tank walls. In the last decade, new sensors have been proposed for their internal installation within the transformer tank in order to avoid such problems. These sensors use optical fiber technology to withstand the harsh environment inside the transformers. A variety of them have been proposed: sensors based on Fabry-Perot cavities, fiber-optic interferometric sensors and sensors based on fiber Bragg gratings. With the development of these fiber-optic internal sensors a new research interest has also arisen about the development of new multichannel instrumentation systems for the localization of partial discharges using fiber-optic sensors.

This dissertation is devoted to these both topics. A major contribution is the design and development of a multichannel interferometric instrumentation system for acoustic monitoring of partial discharges and their localization by using fiber-optic sensors. The design of the multichannel system is based on a fiber-optic heterodyne interferometer that

is configured as a Mach-Zehnder scheme with multiple sensing arms in parallel and a common reference arm. This interferometric multiplexing system has been demonstrated with four channels in which a high resolution is obtained in the measurement of acoustic pressure (1 Pa @ 150 kHz). The capability of this system for localizing the acoustic emission sources by means of the simultaneous measurement with multiple sensors has also been demonstrated experimentally. In addition, in these experiments synthetic noise was added to the measurements of the times of arrival in order to evaluate the performance of the system. The results of the acoustic source localization show a standard deviation better than 1 cm in each axis (~1% of the normalized dimension of the tank).

The second major contribution is the research and development of a fiber-optic probe, compatible with the multichannel interferometric system. The design of the fiber-optic sensing head is based on a coil of optical fiber with multiple layers. It is compact, rugged and cost-effective. An adequate sensitivity was achieved with 17 m of fiber disposed in a coil with 5 layers. Combined with the heterodyne interferometer the fiber-optic interferometric sensor is able to detect the acoustic emission of partial discharges at 150 kHz with resolution of 1 Pa in a range of up to 17 kPa. The complete characterization of the fiber-optic probe was performed in an acoustic test bench that was designed for ultrasound tests with acoustic emissions that reproduce the characteristics of those generated by partial discharges. The fiber-optic sensing probe has also been characterized in high voltage experiments, where different types of partial discharges were generated in transformer oil and in different conditions. It was tested in high voltage AC setups, with internal partial discharges, with surface partial discharges, and also in high voltage DC setups, thus its effectiveness for detecting partial discharges under a wide range of conditions was demonstrated. It is worth mentioning that the acoustic detection of internal partial discharges in a transformer with a fiber-optic sensor was demonstrated for the first time.

Keywords: Multichannel instrumentation system, fiber optic heterodyne interferometer, fiber-optic interferometric sensor, acoustic emission, ultrasound, partial discharges.

Índice general

Resumen	vii
ABSTRACT	IX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Estructura de la tesis.....	6
1.4 Proyectos de investigación y colaboraciones	9
CAPÍTULO 2	11
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA EMISIONES ACÚSTICAS DE DESCARGAS PARCIALES	11
2.1 Introducción	11
2.2 Emisiones acústicas de descargas parciales	12
2.3 Sensores de fibra óptica para medida acústica en el interior	18
2.3.1 Sensores de fibra óptica basados en cavidades Fabry-Perot	19
2.3.1.1 Principio de funcionamiento	19
2.3.1.2 Características del sensor	23
2.3.2 Sensores interferométricos de fibra óptica.....	27
2.3.2.1 Principio de funcionamiento	27
2.3.2.2 Características del sensor	29
2.3.3 Sensores basados en redes de Bragg inscritas en fibra óptica (FBG)	33
2.3.3.1 Principio de funcionamiento	34
2.3.3.2 Características del sensor	35
2.4 Discusión.....	38

CAPÍTULO 3	41
DISEÑO DE UN SENSOR INTRÍNSECO DE FIBRA ÓPTICA PARA LA DETECCIÓN ACÚSTICA DE DESCARGAS PARCIALES	41
3.1 Introducción	41
3.2 Principio de funcionamiento del sensor	42
3.3 Diseño del sensor de fibra óptica	43
3.4 Caracterización del sensor de fibra óptica.....	47
3.4.1 Esquema experimental utilizado en los ensayos de caracterización del sensor.....	47
3.4.1.1 Plataforma experimental de generación de emisiones acústicas.....	47
3.4.1.2 Interferómetro de fibra óptica con detección homodina activa.....	51
3.4.2 Detección de emisiones acústicas y sensibilidad a 150 kHz.....	53
3.4.2.1 Detección de emisiones acústicas	53
3.4.2.2 Sensibilidad a 150 kHz.....	55
3.4.3 Respuesta en frecuencia.....	57
3.4.4 Direccionalidad.....	58
CAPÍTULO 4	61
SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN MULTICANAL PARA LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDOS CON SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....	61
4.1 Introducción	61
4.2 Interferometría láser heterodina	62
4.3 Diseño del interferómetro heterodino multicanal.....	65
4.4 Caracterización del sistema de instrumentación	70
4.4.1 Caracterización de la fuente de luz láser	70
4.4.1.1 Medida del espectro óptico y longitud de onda.....	70
4.4.1.2 Medida de la potencia óptica y estabilidad del láser	72
4.4.1.3 Caracterización del ruido de fase	72
4.4.2 Caracterización del demodulador digital de fase.....	74
4.4.2.1 Estimación de la resolución y el rango dinámico del demodulador digital de fase.....	75
4.4.2.2 Calibración de la medida de fase.....	77
4.4.3 Estudio del ruido en el sistema y medida de la resolución	78
4.4.4 Detección de emisiones acústicas.....	81
CAPÍTULO 5	83
RESULTADOS EXPERIMENTALES ORIENTADOS HACIA LA APLICACIÓN	83
5.1 Introducción	83
5.2 Detección de descargas parciales en experimentos de alta tensión.....	84
5.2.1 Descripción del experimento	84
5.2.2 Resultados experimentales de medidas acústicas de descargas parciales.....	88
5.3 Localización de fuentes de emisión acústica.....	90
5.3.1 Descripción del experimento	90
5.3.2 Resultados experimentales de localización de fuentes de emisiones acústicas	94

CAPÍTULO 6.....	99
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	99
6.1 Conclusiones	99
6.2 Trabajo futuro.....	103
CONCLUSIONS	107
LISTA DE PUBLICACIONES.....	111
GLOSARIO	113
REFERENCIAS	115
ANEXOS	130
EXTENDED SUMMARY OF THE PHD THESIS.....	135
1 Introduction.....	143
2 State-of-the-art sensors for the acoustic detection of partial discharges.....	149
3 The fiber optic sensing probe for the acoustic measurement of partial discharges .	154
4 The multichannel fiber optic heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in transformers	166
5 Experimental results related to the application.....	177
6 Conclusions and future work	181
List of publications related to this research work	188
References.....	191

Índice de figuras

<i>Figura 2.1. Tipos de descargas parciales [2.3]. (a) descargas tipo corona, (b) descargas superficiales, (c) descargas internas y (d) arborescencia eléctrica, que involucra descargas internas y corona.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.2. (a) Espectro de EA generadas por DP producidas en vacuolas de diferentes tamaños sumergidas en aceite de transformador [2.9]. (b) Ejemplo de una señal de EA típica de una DP detectada con un sensor PZT externo (abajo) y su correspondiente espectro de frecuencia (arriba) [2.10].</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.3. Velocidad de propagación de los ultrasonidos en aceite de transformador en función de la temperatura [2.11].</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.4. Principio de funcionamiento de un sensor Fabry-Perot.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.5. Respuesta de una cavidad Fabry-Perot.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.6. Esquema de los sensores FP para la detección acústica de DP propuestos en (a) New Jersey Institute of Technology [2.18] y (b) Virginia Tech [2.19].</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.7. Esquema básico de detección con un sensor FP.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.8. Principio de funcionamiento de la estabilización activa.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.9. Esquema de un sensor FP intrínseco [2.25].</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.10. Sistema de instrumentación multicanal con sensores FP y detección interferométrica en cuadratura [2.36].</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.11. Sensor interferométrico de FO.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.12. Esquema básico de un interferómetro Mach-Zehnder.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.13. Interferómetro Mach-Zehnder con estabilización y detección homodina activa.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.14. Esquema de un sistema interferométrico Mach Zehnder multicanal con brazos de medida en paralelo y brazo de referencia común.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.15. Estructura de una red de Bragg en fibra óptica.</i>	<i>33</i>

<i>Figura 2.16. Sistema de instrumentación para la medida de EA generadas por DP con sensor FBG [2.66].</i>	34
<i>Figura 2.17. Sistema de FO multiplexado para la medida de ultrasonidos con sensores FBG [2.70].</i>	36
<i>Figura 2.18. Esquema propuesto de un sistema multicanal con sensores interferométricos de FO y detección de fase sobre una señal portadora.</i>	40
<i>Figura 3.1. (a) Esquema de la configuración experimental utilizado para caracterizar la sensibilidad de un segmento de fibra óptica. (b) señal acústica de 150 kHz detectada simultáneamente con el segmento de FO y un hidrófono de referencia.</i>	44
<i>Figura 3.2. Estimación de la zona sensible efectiva del sensor a una frecuencia de 150 kHz.</i>	46
<i>Figura 3.3. Construcción del sensor de FO. El diseño en forma de bobina con múltiples capas permite incorporar la longitud de fibra necesaria manteniendo las dimensiones adecuadas en el sensor.</i>	46
<i>Figura 3.4. (a) Señales acústicas de registradas en un banco de generación de DP en aceite con electrodos sometidos a alta tensión. (b) señales acústicas reproducidas en la plataforma experimental de ensayos acústicos en agua. (En ambos casos las señales fueron detectadas con sensores externos modelo R15i).</i>	49
<i>Figura 3.5. (a) Esquema de la configuración experimental utilizada para la caracterización de los sensores en la plataforma de ensayos acústicos en agua. (b) Detalle fotográfico de la plataforma de ensayos acústicos en agua.</i>	50
<i>Figura 3.6. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación optoelectrónico desarrollado para la lectura de fase del sensor de fibra óptica.</i>	51
<i>Figura 3.7. Respuesta doble observada en el sensor de FO.</i>	53
<i>Figura 3.8. Sensor de FO (a) sin encapsulado, (b) con encapsulado.</i>	54
<i>Figura 3.9. Respuesta típica del sensor de FO encapsulado ante una EA de corta duración.</i>	55
<i>Figura 3.10. EA de 150 kHz detectada durante la calibración de sensibilidad.</i>	56
<i>Figura 3.11. Respuesta en frecuencia del sensor de FO.</i>	57
<i>Figura 3.12. Direccionalidad del sensor interferométrico de FO sin encapsulado y del sensor externo R15i a una frecuencia de 150 kHz.</i>	58
<i>Figura 3.13. Direccionalidad del sensor interno de FO con el encapsulado. (a) direccionalidad en el plano x-y, (b) direccionalidad en el plano z-y.</i>	59
<i>Figura 3.14. Ejemplo de la colocación de un sensor de FO para la inspección de un devanado de transformador aprovechando el amplio ángulo de visión en el plano z-y para cubrir toda la altura del devanado.</i>	60
<i>Figura 4.1. Fenómeno de batido causado por la superposición de dos ondas monocromáticas con una diferencia de frecuencia.</i>	63
<i>Figura 4.2. Esquemas simplificados de interferómetros heterodinos en configuración (a) Michelson y (b) Mach-Zehnder.</i>	64
<i>Figura 4.3. Esquema del sistema interferométrico multicanal. (a) Fuente de luz, (b) modulador acusto – óptico, (c) acoplamiento a fibra óptica, (d) acopladores 50:50 – división de haz, (e) brazos del interferómetro – sensores de fibra óptica y brazo de referencia, (f) acopladores 50:50 – combinación de haz para la obtención de la señal interferométrica, (g) detección balanceada de la señal interferométrica, (h)</i>	

<i>conversión a frecuencia intermedia y acondicionamiento de la señal portadora, (i) sistema de adquisición multinacional y procesamiento digital.</i>	67
Figura 4.4. Diagrama de bloques simplificado del instrumento virtual desarrollado para la demodulación I/Q de la señal portadora de cada canal.	69
Figura 4.5. Montaje utilizado para acoplar el láser a fibra óptica durante las medidas con el SA.	71
Figura 4.6. Espectro óptico del láser.	71
Figura 4.7. Potencia óptica emitida por el dispositivo láser.	72
Figura 4.8. Esquema utilizado para la medición del ruido de fase del láser.	73
Figura 4.9. Ruido de fase del láser normalizado a 1 m de diferencia de camino óptico.	74
Figura 4.10. Límite superior en el rango dinámico del demodulador de fase.	76
Figura 4.11. Curva de calibración del demodulador de fase.	77
Figura 4.12. Estimación de la fase mínima detectable en el sistema.	80
Figura 4.13. Fase mínima detectable en el sistema.	81
Figura 4.14. Detección de EA en cada uno de los canales del sistema de instrumentación.	82
Figura 5.1. Esquema eléctrico del experimento de generación y detección de descargas parciales en aceite de transformador.	85
Figura 5.2. Objetos de ensayo utilizados en el experimento: (a) configuración plano – plano (generación de DP internas) y (b) configuración punta – plano (generación de DP superficiales).	86
Figura 5.3. (a) Disposición de los sensores durante el experimento.	87
Figura 5.4. Fotografía de la plataforma de generación de DP, en el que se observa el sensor interno de FO, el conjunto de electrodos en configuración plano - plano y el sensor externo R15i.	87
Figura 5.5. Fotografía de la versión portátil del instrumento de medida de un canal con sensor de FO.	88
Figura 5.6. Medida acústica de DP generadas en aceite de transformador. (a) Detección de descargas parciales de tipo internas y (b) descargas parciales superficiales.	89
Figura 5.7. Configuración propuesta de la colocación interna de los sensores de FO para la monitorización de un transformador trifásico.	90
Figura 5.8. Arreglo experimental utilizado en los ensayos de localización de fuentes de EA. (a) Barrido en el eje x , (b) barrido en el eje z .	91
Figura 5.9. Fotografía de la plataforma de ensayos en la que se observan la matriz de sensores utilizada durante las medidas.	92
Figura 5.10. Señales acústicas detectadas con el sistema multicanal durante la medición simultánea utilizando tres sensores de FO.	93
Figura 5.11. Esquema simplificado del IV utilizado para la localización de fuentes de EA.	93
Figura 5.12. Amplitud normalizada de las EA detectadas para el barrido en el eje x (a) y en z (b).	95
Figura 5.13. TOA de las EA encontrados para el barrido en el eje x (a) y en z (b).	96

<i>Figura 5.14. Resultado de la localización de las fuentes de EA para el barrido en el eje x.</i>	97
<i>Figura 5.15. Proyecciones de las posiciones de la fuente de EA encontradas por el sistema de instrumentación: (a) en el plano x-y y (b) en x-z.</i>	97
<i>Figura 6.1. Esquema propuesto de un vibrómetro laser para medidas sin contacto en múltiples puntos basado en el sistema de instrumentación multicanal con interferómetro heterodino.</i>	105
<i>Figura 6.2. Esquema propuesto de un sistema interferométrico para la medida en alta resolución de EA de ultrasonido con sensores FBG multiplexados.</i>	106

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1. Características de las EA generadas por DP en aceite de transformador</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.2. Resumen de las características de los diferentes sensores de FO para la detección de DP.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3.1. Sensibilidad del sensor de FO a 150 kHz</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 3.2. Características del sensor de FO.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4.1. Características de la fuente de luz.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 4.2. Componentes de ruido en el sistema.....</i>	<i>79</i>

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Los transformadores de potencia son parte fundamental de la red eléctrica y su operación continua resulta vital para garantizar un servicio eficiente. La necesidad de mantener los transformadores en servicio y las nuevas tendencias hacia sistemas eléctricos más eficientes, tales como los sistemas de alta tensión en DC (HVDC) [1.1], han despertado un interés continuo en el desarrollo de nuevos y mejores sistemas de monitorización y diagnóstico de transformadores [1.2]–[1.9]. Éstos se utilizan para evaluar el estado del sistema de aislamiento interno del transformador, lo cual resulta de vital importancia para garantizar una operación estable, segura y fiable. En particular, los sistemas de monitorización continua (análisis con el transformador en servicio, sin necesidad de descargo), son de gran interés ya que maximizan la disponibilidad de los transformadores y permiten la detección de fallos en una etapa temprana, permitiendo así tomar las medidas de compensación adecuadas con suficiente antelación para evitar daños severos [1.10]–[1.12].

Entre las técnicas de monitorización en línea están la detección de descargas parciales (DP) y el análisis de gases disueltos en aceite (DGA). DGA es una de las técnicas convencionales más utilizadas. Consiste en realizar un análisis de la concentración de ciertos gases en el aceite. La composición de estos gases depende del tipo de fallo. Por medio de DGA se pueden diagnosticar fallos como sobrecalentamiento, formación de arcos eléctricos e incluso los efectos causados por DP [1.13], [1.14]. Las pruebas de DGA normalmente se realizan en un laboratorio a partir de muestras de aceite tomadas del transformador, si bien recientemente se encuentran disponibles sistemas para DGA en línea que utilizan sensores instalados en el transformador. Aunque el DGA es una técnica fiable, presenta el inconveniente del retardo de tiempo que transcurre entre el inicio del fallo y la generación de la cantidad necesaria de gases para poder determinar que ocurre un comportamiento anormal en el transformador. Otra de las limitaciones que presenta este método es que no proporciona información acerca de la ubicación del fallo en el transformador, lo que sí es posible por medio de la detección acústica de DP y resulta de gran utilidad en aparatos de gran tamaño como los transformadores de potencia.

Las DP son pequeñas descargas eléctricas presentes en un aislante como resultado de una ruptura eléctrica producida en una vacuola de gas (p. ej. aire) o en un campo eléctrico altamente no uniforme [1.15]. La actividad de DP está asociada al deterioro del sistema de aislamiento en un transformador, por lo cual, la monitorización de este fenómeno se utiliza como herramienta de diagnóstico en transformadores. Cuando ocurre una DP se produce una liberación súbita de energía que se manifiesta de múltiples formas: como cambios químicos y estructurales en los materiales, generación de señales electromagnéticas y emisiones acústicas (EA), entre otras, las cuales se emplean para detectar indirectamente la actividad de DP. Las técnicas que se emplean principalmente para detectar DP son el DGA, la medida de transitorios eléctricos de alta frecuencia (en las bandas de HF y VHF) [1.16], la detección de señales electromagnéticas radiadas en la banda de UHF [1.17], [1.18], y la detección de emisiones acústicas (EA) en la banda de ultrasonidos [1.19]. Entre estas técnicas, la detección por medio de EA y la detección de señales UHF son las únicas que proporcionan información sobre dónde se localiza la zona en que se produce la actividad de DP. Esto es posible debido a que las DP se comportan como una fuente puntual de radiación que genera señales de EA y UHF. La posición de tales fuentes de señal, y por tanto del origen de fallos en el aislamiento del transformador,

se consigue por medio de técnicas de localización. La trilateración es la técnica que normalmente se utiliza para este fin. Se basa en los tiempos de llegada (TOA) de las señales de DP hasta diferentes sensores colocados en varios puntos del espacio. Por lo tanto, se necesita un sistema multicanal para obtener una medida de las señales con varios sensores de forma simultánea.

Aunque la detección y localización de fuentes de DP por medio de señales UHF se ha probado en transformadores [1.20]–[1.22], la instalación de los sensores presenta ciertos inconvenientes ya que las señales de UHF no pueden atravesar las paredes del tanque del transformador, por lo que se requiere de la instalación previa de ventanas dieléctricas en el tanque que proporcionen un sitio desde donde se pueda tener una visión de las ondas electromagnéticas dentro del tanque. Otro de los problemas es la reflexión y refracción de las señales UHF producidas por obstáculos como el núcleo, los conductores de cobre de los arrollamientos, etc., los cuales producen múltiples trayectorias de llegada hasta los sensores que dificultan la localización de las fuentes de DP.

Por su parte, la detección y localización de DP por medio de EA se realiza normalmente con sensores piezoeléctricos (PZT) de ultrasonido colocados sobre las paredes del tanque del transformador. Éstos no necesitan la instalación previa de un punto de montaje, lo cual representa una ventaja. Además, en el caso de detectar señales de EA de baja amplitud, los sensores PZT pueden recolocarse convenientemente hasta encontrar una posición en donde las señales sean más intensas. Las EA generadas por las DP se detectan normalmente en el rango de 100 kHz – 300 kHz, utilizando para ello sensores PZT resonantes a 150 kHz.

Al igual que sucede con la detección de señales UHF, las múltiples trayectorias de las señales de EA a través de las paredes del tanque pueden afectar a la detección acústica de DP y su localización. Además, la atenuación de la señal de EA a través del medio de propagación (principalmente aceite de transformador), y también el efecto que se produce en la interfaz aceite - metal cuando las señales acústicas llegan a las paredes del tanque, deterioran las señales de EA y reducen su amplitud, lo que hace más difícil su detección. Para superar estos problemas, en la última década y durante la investigación llevada a cabo para esta tesis, se han investigado y desarrollado nuevos sensores diseñados para ser instalados dentro del tanque del transformador [1.23]–[1.26]. Estos sensores emplean tecnología de fibra óptica (FO) para poder soportar las condiciones del entorno en el

interior del transformador. La instalación en el interior proporciona a este tipo de sensores una posición privilegiada ya que pueden detectar una señal acústica más fuerte y clara. La investigación en este tipo de sensores para la detección de DP ha motivado también el interés por investigar nuevos sistemas de instrumentación optoelectrónicos para la medida simultánea multipunto con sensores de FO, con el fin de monitorizar y localizar fallos en los transformadores de potencia [1.27].

En este documento de tesis doctoral se presenta el diseño y desarrollo de un nuevo sistema de instrumentación optoelectrónico para monitorizar transformadores de potencia, utilizando para ello técnicas de EA y múltiples sensores internos de FO. También se presenta el desarrollo de la sonda interferométrica de FO para la medida acústica de DP. Además de la monitorización en línea, este sistema de instrumentación cuenta con la capacidad de localizar fallos en el aislamiento, lo cual consigue basándose en la medida de los TOA de las señales de EA.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar un nuevo sistema de instrumentación multicanal con sensores de fibra óptica para la detección de emisiones acústicas de ultrasonido generadas por descargas parciales. Sobre esta base, se establecen los siguientes objetivos parciales:

- Estudiar y actualizar los sensores de fibra óptica de vanguardia para la detección acústica de descargas parciales en transformadores de potencia con aislamiento de papel-aceite.
- Desarrollar un nuevo sensor interferométrico de fibra óptica para la medida de emisiones acústicas generadas por descargas parciales de todos los tipos.
- Caracterizar exhaustivamente la sonda de fibra óptica con el fin de demostrar su idoneidad para la medida acústica de descargas parciales.
- Validar la sonda de fibra óptica en instalaciones con diferentes descargas parciales generadas con alta tensión en aceite de transformador.
- Desarrollar y caracterizar el interferómetro heterodino multicanal para una implementación de cuatro canales (4 sensores).
- Demostrar experimentalmente la capacidad de localización del sistema interferométrico multicanal.

1.3 Estructura de la tesis

El presente documento de tesis está estructurado en seis capítulos. En el capítulo 1, se describe la motivación y los objetivos de la investigación.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte de los sensores de FO desarrollados para la detección acústica de DP. Primeramente, se estudian los diferentes tipos de DP y las características principales de las EA generadas por las DP con el fin de conocer las especificaciones necesarias para el sensor de FO y el sistema de medida. El estudio del estado de arte se enfoca en tres tipos de sensores propuestos para la detección acústica de DP. Estos son: los sensores basados en cavidades de Fabry-Perot, los sensores interferométricos de FO y los sensores basados en redes de Bragg en fibra (FBG). Se hace una síntesis de las características más relevantes de cada uno de ellos y, como parte final, se incluye una discusión en la que, aplicado a la monitorización de DP, se propone un sistema interferométrico multicanal para la detección multipunto de EA con sensores intrínsecos de FO. También se incluyen los sensores y sistemas de medida más recientes, incluso los que han sido desarrollados paralelamente a este trabajo de investigación y que fueron reportados posteriormente a la propuesta planteada en esta tesis.

El capítulo 3 está dedicado al diseño del sensor interferométrico de FO desarrollado para la medida acústica de DP. Se presenta el principio de medida y el diseño del sensor de FO desde su concepción a partir de un tramo de fibra óptica sensible a las variaciones de presión acústica, hasta su implementación como una sonda de medida con un diseño compacto, robusto y de bajo coste. Esta sonda de medida de FO está diseñada para detectar EA de 150 kHz. También se incluye en ese capítulo una caracterización exhaustiva (sensibilidad, respuesta en frecuencia y direccionalidad). Además del sensor de FO, se desarrolló un interferómetro de FO para medir la fase óptica de este sensor. El interferómetro se implementó en un formato robusto, compacto y portátil con el fin de facilitar las mediciones en entornos reales fuera del laboratorio, tales como las instalaciones de alta tensión en las que se realizaron las medidas acústicas de DP con la sonda inmersa en aceite de transformador.

El diseño del sistema interferométrico multicanal para la detección de EA con sensores de FO se presenta en el capítulo 4. Primeramente, se realiza una introducción a la interferometría láser heterodina. Posteriormente, se presenta el diseño del interferómetro multicanal para una implementación de 4 canales. Además, se realiza la caracterización del láser, del ruido en el sistema, del demodulador de fase digital y también se muestran los resultados de las medidas de EA en cada uno de los canales.

En el capítulo 5 se muestran los resultados experimentales enfocados hacia la aplicación de detección acústica de DP. Estos son los resultados de ensayos realizados para caracterizar la sonda de FO en entornos de alta tensión, las medidas de TOA de señales de EA, una configuración propuesta para la monitorización de transformadores trifásicos de potencia y la localización de fuentes de EA con el sistema de instrumentación multicanal.

Finalmente, las conclusiones de este trabajo de investigación y algunas propuestas de futuros trabajos de investigación se presentan en el capítulo 6. En ese capítulo también se incluyen las contribuciones más destacadas del presente trabajo y las publicaciones más importantes derivadas del mismo.

Debido a que este documento de tesis ha sido escrito en español, con excepción del resumen y las conclusiones, se ha escrito adicionalmente un resumen extendido (*report*) con el fin de proporcionar una versión más completa a la comunidad investigadora internacional y, en particular, a los miembros del tribunal evaluador y a los expertos internacionales. El *report* no es una traducción del documento de tesis sino un resumen de la misma con base en los artículos de investigación que son más relevantes para la tesis y que fueron publicados durante el desarrollo de esta investigación. El cuerpo de la tesis se resume en este documento haciendo énfasis en los aspectos y los logros más importantes.

Las secciones 1 y 6 del *report* son una traducción literal de los capítulos 1 y 6 de la tesis. El capítulo 2 de la tesis se encuentra resumido en la sección 2 del *report*. En las secciones 3 y 4 del *report* se presenta un resumen de los capítulos 3 y 4 de la tesis con base en las dos publicaciones que recogen las dos contribuciones principales: el sensor de FO y el interferómetro heterodino multicanal de FO. Además, los resultados de las medidas acústicas de DP realizadas en instalaciones de alta tensión también están

incluidos en la publicación adjunta con la sección 3 del *report*. Incluidos en la publicación adjunta a la sección 4 del *report* se encuentran los resultados de las medidas de TOA de las EA y una configuración propuesta para la monitorización de un transformador trifásico utilizando el sistema interferométrico multicanal. Todos estos resultados se citan en la sección 5 que además incluye otros aún no publicados procedentes de los experimentos desarrollados con el fin de localizar fuentes de EA.

1.4 Proyectos de investigación y colaboraciones

El presente trabajo de investigación ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del proyecto coordinado “*Sistema de instrumentación multicanal para la medida de descargas parciales en campo mediante la integración de sensores acústicos y eléctricos. Aplicación a su localización y análisis en transformadores de alta potencia,*” (DPI2009-14628-C03-0, coordinador Prof. José Antonio García Souto), y el subproyecto “*Interferómetro multicanal con fibra óptica para medida de descargas parciales en el interior de transformadores. Nueva instrumentación de ultrasonidos para detección y localización continua en campo,*” (No. DPI2009-14628-C03-01, I.P. Prof. José Antonio García Souto).

Las medidas acústicas de DP en experimentos con HVAC fueron realizadas en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid, en colaboración con el Grupo de diagnóstico de máquinas eléctricas y materiales aislantes (DIAMAT), Departamento de Ingeniería Eléctrica, dentro del contexto del proyecto coordinado (DPI2009-14628-C03-0).

Las medidas acústicas de DP en experimentos con HVDC fueron realizadas en colaboración con el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Bolonia. Estas fueron llevadas a cabo durante una estancia de investigación de I. Búa-Núñez y una visita corta del autor, bajo la supervisión del Prof. Andrea Cavallini en 2013.

En colaboración con INESC – Porto, Portugal, durante una estancia de investigación del autor en 2013, bajo la supervisión del Prof. José Luis Santos se realizó una investigación enfocada en los sistemas rápidos de interrogación de sensores FBG para la medida de ultrasonidos.

En colaboración con el Applied Optics Group de University of Kent, UK, bajo la supervisión del Prof. David A. Jackson y durante una estancia de investigación de tres meses realizada por el autor en 2014, se realizó una investigación enfocada al desarrollo de un interferómetro heterodino de FO para la medida simultánea con cuatro canales.

Capítulo 2

Sensores de fibra óptica para emisiones acústicas de descargas parciales

2.1 Introducción

Las dificultades que supone la detección acústica de DP con sensores PZT externos, como lo son la baja amplitud de las señales, los rebotes en las paredes del tanque, etc., ha motivado a desarrollar un nuevo tipo de sensores basados en tecnologías de fibra óptica que están preparados para su instalación en el interior del tanque del transformador, sumergidos en el aceite dieléctrico. En el presente capítulo se recopila el estado del arte de este nuevo tipo de sensores, destacando los aspectos más relevantes de cada uno de ellos. Previamente se hace una introducción a las emisiones acústicas procedentes de descargas parciales. Finalmente, se propone el desarrollo de un sistema de instrumentación multicanal con sensores de fibra óptica para la monitorización de transformadores por medio de la detección de EA generadas por DP.

2.2 Emisiones acústicas de descargas parciales

Según el estándar IEC 60270, por medio del cual se normalizan las técnicas de medida de DP en equipos eléctricos cuando se realizan pruebas con tensiones alternas de hasta 400 Hz o con tensión continua, una descarga parcial es una descarga eléctrica localizada que cortocircuita sólo parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede ser, o no, adyacente a un conductor [2.1].

Las DP pueden ocurrir en cavidades llenas de gas (vacuolas) dentro de un aislamiento sólido, como p. ej. papel, polímero, etc., o también en burbujas de gas presentes dentro de aislamientos líquidos o alrededor de un electrodo en un medio gaseoso. Las DP son por naturaleza destructivas y causan un envejecimiento del material aislante. Si la actividad de DP se produce en un material orgánico, bien sea sólido o líquido (p. ej. papel, aceite, caucho, poliéster, etc.), las DP degradarán este material por lo que, eventualmente, se producirá un fallo en el aislamiento eléctrico que finalmente ocasionará la avería del equipo [2.2].

Las DP se pueden clasificar en cuatro tipos, que son [2.3]:

- *Descargas de tipo corona*: Este tipo de descargas normalmente ocurren en las proximidades de una punta fina o el borde de un contacto metálico, o cercanas a una partícula conductora cuyo campo circundante es extremadamente alto debido a divergencias o a distribuciones de campo no homogéneas (Fig. 2.1a). Es un tipo de DP muy frecuente en equipos exteriores y normalmente se presenta en las puntas o en los bordes afilados de los conductores. La descarga en corona puede considerarse relativamente inofensiva en equipos de exteriores, ya que los gases corrosivos son eliminados o transportados lejos por los efectos meteorológicos. Sin embargo, si la descarga tipo corona tiene lugar en un entorno cerrado, los gases corrosivos no tienen salida y pueden producir daños adicionales.

- *Descargas superficiales*: Estas DP ocurren en la superficie de un material dieléctrico (Fig. 2.1b). Es una forma de descarga parcial relativamente común y está estrechamente relacionada con la contaminación y la humedad. Cuando se produce este tipo de DP, normalmente se generan pistas de conducción sobre la superficie del aislante que reducen su eficacia.

- *Descargas internas*: Ocurren en inclusiones o vacuolas que existen originalmente en el material dieléctrico, o en canales creados por el estrés de un campo eléctrico elevado (Fig. 2.1c).

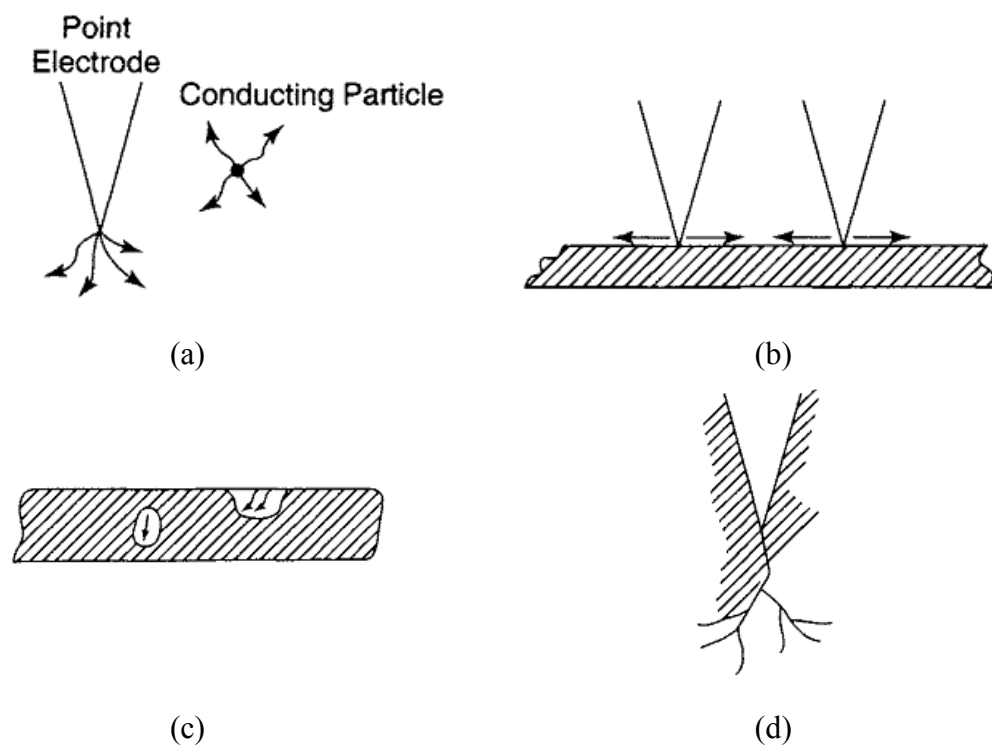


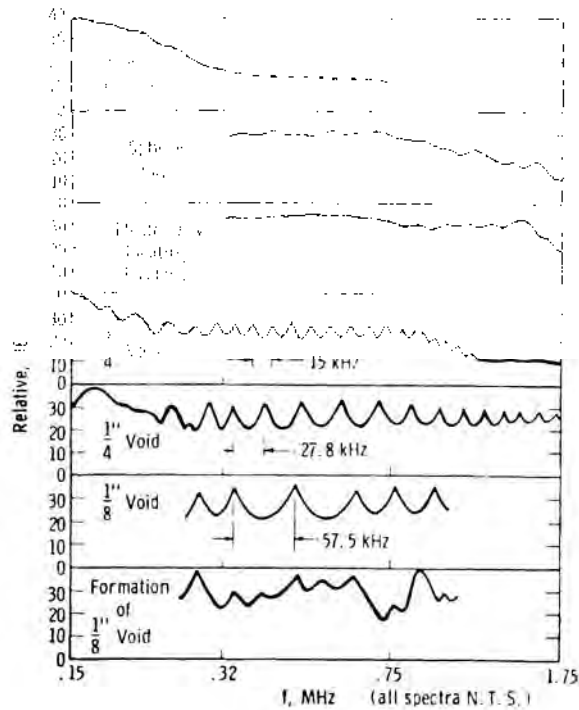
Figura 2.1. Tipos de descargas parciales [2.3]. (a) descargas tipo corona, (b) descargas superficiales, (c) descargas internas y (d) arborescencia eléctrica, que involucra descargas internas y corona.

- *Arborescencia eléctrica (Electrical treeing)*: Se puede considerar como una combinación de descargas internas y de tipo corona. La arborescencia eléctrica se inicia y se propaga gradualmente cuando un material dieléctrico sólido se somete al estrés de un campo eléctrico elevado y divergente durante un tiempo prolongado (Fig. 2.1d).

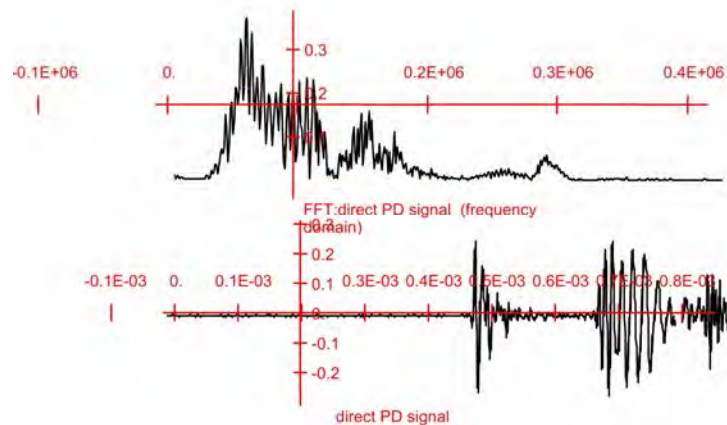
La aparición del fenómeno de DP viene acompañada de una liberación de energía en múltiples formas tales como la emisión de señales electromagnéticas, emisiones acústicas (EA), cambios químicos en el material aislante, etc., algunos de los cuales se utilizan para detectar de manera indirecta la actividad de DP. Los métodos más comunes para este fin son el análisis de gases disueltos en el aceite, la medida eléctrica de la carga aparente desplazada por la DP y la detección de las EA [2.4], [2.5].

Cuando aparece una DP se produce una liberación localizada de energía que transcurre de manera casi instantánea. Una parte de esa energía calienta el material circundante a la DP y llega a evaporar parte del mismo. Lundgaard [2.6], haciendo una analogía, afirma que una DP es similar a una “pequeña explosión”, la cual excita una onda mecánica que posteriormente viaja a través del aislamiento. En otras palabras, una descarga se comporta como una fuente puntual de EA.

La amplitud de las EA generadas por DP está en el rango de 1Pa a 10 kPa [2.7], [2.8]. Debido a que las DP son de una duración muy corta, las emisiones acústicas generadas son ultrasonidos que abarcan un amplio espectro de frecuencias, llegando a alcanzar hasta algunos megahercios. En un estudio realizado por Harrold [2.9] en el que se generaron DP en aceite de transformador introduciendo vacuolas de diferentes diámetros entre dos electrodos conectados a alta tensión, se demostró que las EA generadas por las DP presentan un contenido espectral amplio, con picos de resonancia que están relacionados con el tamaño de la vacuola. En la Fig. 2.2a se muestra el espectro de diferentes señales de EA correspondientes a DP generadas con vacuolas de diferente diámetro. También se muestra en la Fig. 2.2b la señal típica de una EA generada por una DP obtenida con un sensor PZT externo [2.10].



(a)



(b)

Figura 2.2. (a) Espectro de EA generadas por DP producidas en vacuolas de diferentes tamaños sumergidas en aceite de transformador [2.9]. (b) Ejemplo de una señal de EA típica de una DP detectada con un sensor PZT externo (abajo) y su correspondiente espectro de frecuencia (arriba) [2.10].

Las EA generadas por las DP se presentan en forma de ráfagas (Fig. 2.2b) con pulsos que tienen una duración de alrededor de $100 \mu\text{s}$. La velocidad de propagación de las EA producidas por las DP y los factores que afectan a la misma fueron estudiados por Howells y Norton [2.11], quienes determinaron experimentalmente que, para un rango de temperatura del aceite de transformador comprendido entre -30°C y 130°C , se puede

aproximar por medio de un polinomio de orden 6 cuyos coeficientes se muestran en la Fig. 2.3.

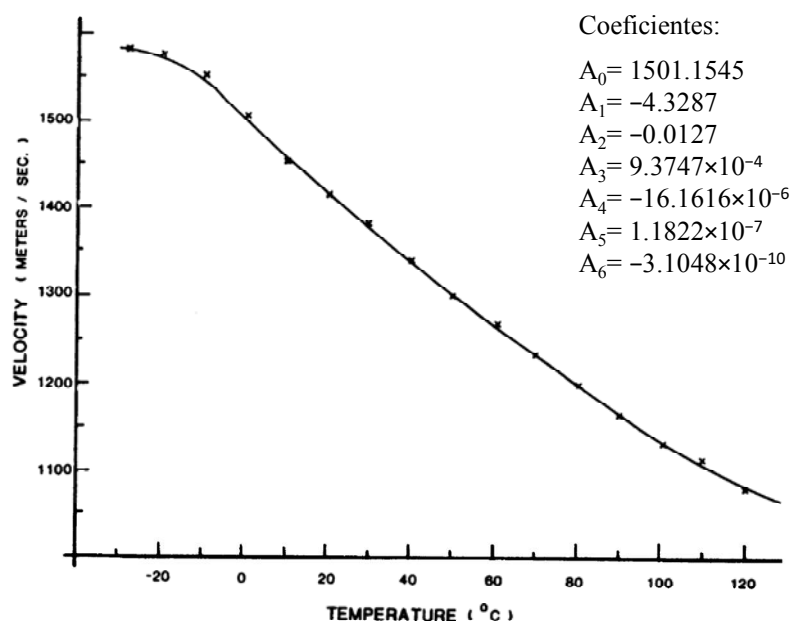


Figura 2.3. Velocidad de propagación de los ultrasonidos en aceite de transformador en función de la temperatura [2.11].

Debido a que la atenuación que experimenta la EA en el aceite de transformador es más fuerte a frecuencias más altas, el mayor contenido de energía de estas señales acústicas se encuentra entre 20 kHz y 300 kHz. Es común encontrar que la detección de DP en condiciones de laboratorio se realice con sensores piezoeléctricos (PZT) resonantes a 60 kHz [2.10]. Sin embargo, en un entorno como el de un transformador, se encuentran vibraciones ajenas a las producidas por las DP que dificultan la detección. Tal es el caso de las vibraciones producidas por ventiladores, bombas y otros elementos que conforman un transformador. La mayoría de estas vibraciones se encuentran por debajo de los 30 kHz [2.12], pero el ruido Barkhausen (relacionado con la emisión magnetoacústica producida en el núcleo del transformador) se encuentra en el rango de 30 kHz a 60 kHz [2.8]. Por esta razón, las medidas acústicas de DP en campo se realizan con sensores resonantes a frecuencias >100 kHz, típicamente a 150 kHz [2.10], [2.13].

En diferentes experimentos realizados en aceite de transformador se pudo comprobar que la atenuación de las EA generadas por las DP tiene un comportamiento inversamente proporcional con la distancia (r) a la fuente de emisión [2.9], [2.14], [2.15]. La intensidad

de la EA en función de r evidencia un comportamiento de la forma $1/r^2$, el cual se atribuye a la geometría de un frente de onda esférico [2.6].

Por último, en la tabla 2.1 se presenta un resumen de las características de las EA generadas por las DP que han sido estudiadas en este apartado.

Características	Valores
Rango de amplitud	1 Pa – 10 kPa
Frecuencia de detección	60 kHz (medidas en laboratorio) >100 kHz, 150 kHz típico (medidas en campo)
Duración del pulso de EA	~100 μ s
Atenuación en aceite de transformador	Intensidad acústica en relación $1/r^2$ r es la distancia a la fuente de EA

Tabla 2.1. Características de las EA generadas por DP en aceite de transformador

2.3 Sensores de fibra óptica para medida acústica en el interior

En la última década se ha despertado gran interés en el desarrollo de sensores de FO que instalados en el interior de transformadores de potencia permitan su monitorización por medio de la detección de EA de DP. La instalación dentro de un transformador solo es posible gracias a las cualidades únicas que poseen los sensores de FO. La inmunidad que ofrece este tipo de sensores ante la interferencia electromagnética resulta fundamental para su funcionamiento en un entorno de alta tensión como el que se encuentra en el interior de un transformador [2.16]. Entre las ventajas que se obtienen empleando sensores de FO para realizar la medida de EA desde el interior del transformador se encuentran la posibilidad de detectar señales acústicas de pequeña magnitud y con menos distorsión debido a que, al estar más cerca de la fuente de emisión, la atenuación del medio de propagación es menor y además, la EA no llega a experimentar la atenuación y la distorsión producidas en las paredes del tanque, como les ocurre a los sensores acústicos instalados en el exterior.

Existen varios tipos de sensores que emplean tecnologías de FO y que han sido propuestos para la medida de EA de DP desde el interior de transformadores. Entre los más destacados se encuentran los sensores Fabry-Perot (FP), los sensores interferométricos de FO y los sensores basados en redes de Bragg inscritas en fibra óptica (FBG). A continuación se presenta una revisión de cada uno ellos en la que se comparan sus características y se tratan aspectos como la posibilidad de localizar las fuentes de EA utilizando sistemas multiplexados de FO para la detección con múltiples sensores a la vez.

2.3.1 Sensores de fibra óptica basados en cavidades Fabry-Perot

2.3.1.1 Principio de funcionamiento

Un sensor de tipo Fabry-Perot utiliza una cavidad FP como elemento transductor. Una cavidad FP está formada por dos superficies parcialmente reflectantes separadas una distancia L , tal y como se muestra en la Fig. 2.4.

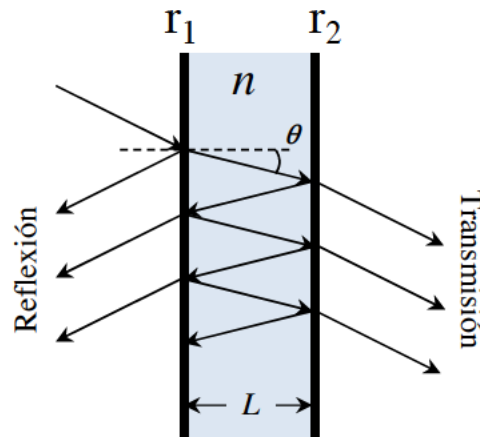


Figura 2.4. Principio de funcionamiento de un sensor Fabry-Perot.

Los sensores basados en cavidades FP están diseñados de tal forma que la magnitud de medida, a la cual está expuesta la cavidad FP, afecta a su longitud (L) modificándola. Como resultado de la interferencia de las múltiples reflexiones de la luz que se producen en la cavidad FP, la transmitancia T presenta una respuesta con una resonancia óptica periódica descrita por la siguiente expresión [2.17]:

$$T = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(\delta)} \quad (2.1)$$

donde $R=r_1=r_2$ es la reflectividad de las dos superficies que conforman la cavidad y δ es la diferencia de fase entre dos elementos consecutivos del conjunto de rayos reflejados o transmitidos en la cavidad. Esta última viene dada por:

$$\delta = \frac{4\pi n L \cos(\theta)}{\lambda} \quad (2.2)$$

donde n es el índice de refracción del medio dentro de la cavidad, λ es la longitud de onda de la luz que ilumina la cavidad y θ es el ángulo de incidencia de los rayos de luz. En la Fig. 2.5 se muestran las respuestas en transmisión y en reflexión de una cavidad FP en función de L .

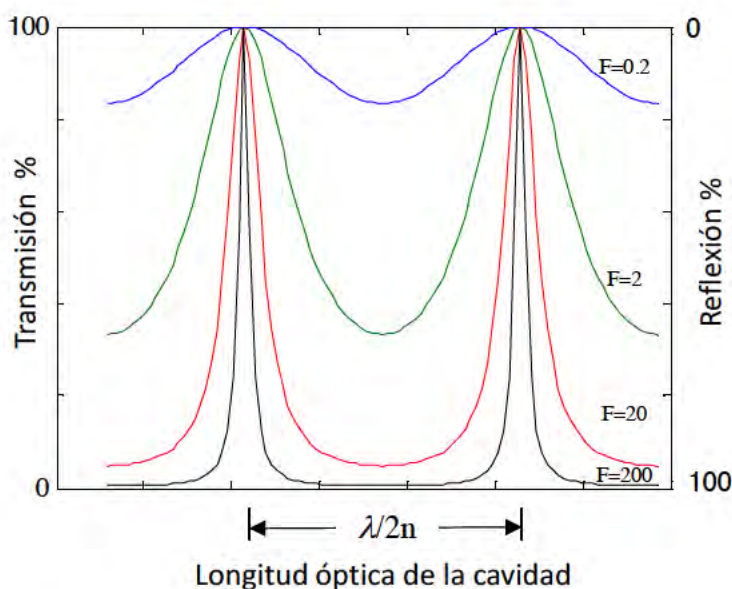


Figura 2.5. Respuesta de una cavidad Fabry-Perot.

Con frecuencia se emplea un parámetro conocido como *finesse* (F) para evaluar la calidad de un interferómetro FP. La *finesse* es la relación entre la separación de franjas adyacentes (correspondiente a un cambio de fase de 2π rad), y la anchura de las franjas a la mitad de su pico máximo de transmisión, esto es:

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (2.3)$$

Como se puede observar en la expresión anterior la *finesse* aumenta conforme aumenta la reflectividad. La respuesta de una cavidad FP para diferentes valores de F también se muestra en la Fig. 2.5. Dependiendo del esquema de lectura del sensor FP, una *finesse* alta permite obtener mayor sensibilidad en un sensor FP a cambio de un rango dinámico limitado. Por el contrario, una baja *finesse* permite obtener una operación cuasi-lineal en un rango más amplio pero la sensibilidad resulta menor en comparación con un sensor FP de alta *finesse*.

El desarrollo de los sensores FP para la detección acústica de DP en transformadores de alta tensión se realizó de forma simultánea, por una parte, en New Jersey Institute of Technology (NJIT) [2.18] y, por otra, en Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech.) [2.19]. Ambos sensores son similares en cuanto a la construcción de la cavidad FP; la cual, es una microcavidad compuesta por una membrana con una superficie reflectante y la superficie del extremo final de una FO. En el gráfico de la Fig. 2.6a y 2.6b se muestra el esquema de ambos sensores.

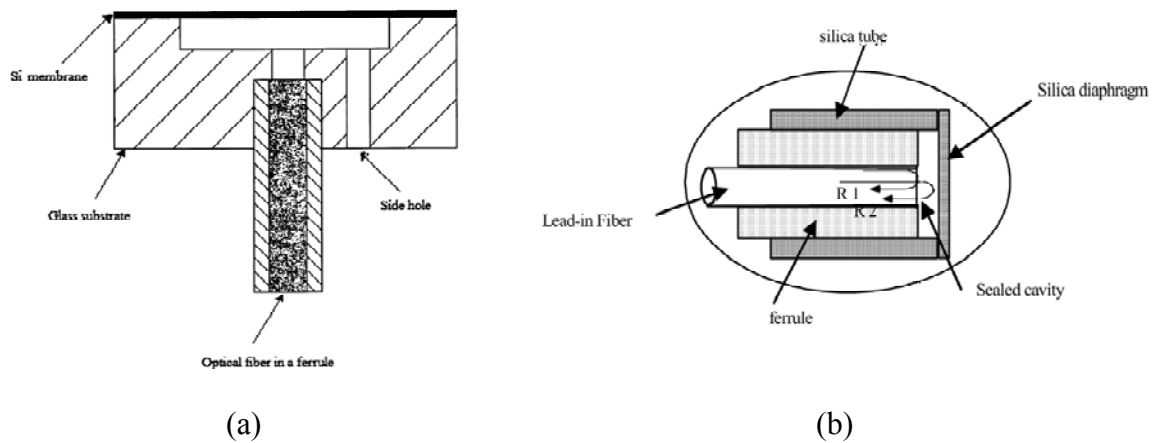


Figura 2.6. Esquema de los sensores FP para la detección acústica de DP propuestos en (a) New Jersey Institute of Technology [2.18] y (b) Virginia Tech [2.19].

En este tipo de sensores la transducción de la onda acústica se consigue a partir de la deflexión producida en la membrana por causa de las variaciones de presión de las ondas acústicas. De esta forma, se produce un cambio en la longitud de la cavidad FP como respuesta a las EA producidas por las DP. Con el fin de maximizar la respuesta del sensor a las frecuencias de interés, el diseño de la membrana de estos sensores está realizado de tal forma que su frecuencia natural de resonancia coincida o esté dentro del ancho de banda de detección típico de las señales acústicas emitidas por las DP, esto es entre 100 kHz y 300 kHz.

El tamaño de la cavidad FP de este tipo de sensores es del orden de decenas de micrómetros. En el sensor mostrado en la Fig. 2.6a la longitud de la cavidad es de $10\mu\text{m}$, mientras que en el de la Fig. 2.6b es de $40\mu\text{m}$.

La membrana que conforma la segunda superficie reflectante (R2) de la microcavidad FP está construida de silicio y se fabrica utilizando tecnologías propias de MEMS (sistemas micro-electromecánicos) [2.20]. En el proceso de fabricación se

emplean las mismas técnicas que en la fabricación de los circuitos integrados, como son: la deposición de capas de material, la fotolitografía, ataques químicos, etc. Las reflexiones en R1 y R2 se producen bien sea debido a la reflexión de Fresnel que tiene lugar en la interfaz silicio-aire ($R=4\%$), en cuyo caso se obtiene un sensor de baja *finesse*; o también, cuando se desea una alta *finesse*, se puede aumentar la reflectividad realizando una deposición de metales, como p. ej. Au, en las superficies del final de la fibra y de la membrana.

En el esquema de la Fig. 2.6a se puede observar además que el sensor tiene implementado un orificio de acceso a la cavidad. Este orificio está conectado a un conducto en el encapsulado del sensor que a su vez comunica con el exterior y a través del cual se puede aplicar una presión dentro de la cavidad FP, que bien puede ser la presión atmosférica, de modo que la medida de presión sea relativa.

Un esquema típico utilizado para obtener la medida en este tipo de sensores es el que se muestra en la Fig. 2.7.

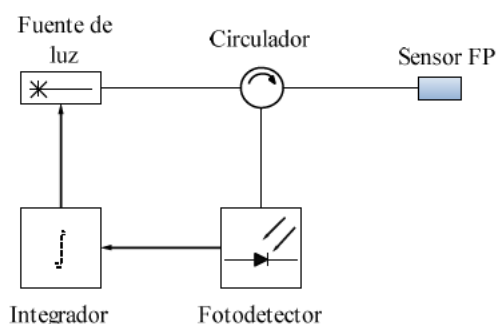


Figura 2.7. Esquema básico de detección con un sensor FP.

En este esquema de FO se ilumina la cavidad FP con un láser y por medio de un circulador se lleva la señal de interferencia hasta un fotodetector, en donde se convierte en una señal eléctrica de fotocorriente. Estos esquemas normalmente están implementados para trabajar con las longitudes de onda típicas que se utilizan en telecomunicaciones, es decir 1300 nm y 1500 nm.

En el esquema se incluye un sistema de estabilización activo para compensar las perturbaciones causadas por la temperatura y también por la presión estática en el interior del tanque del transformador, las cuales modifican el punto de operación del sensor, pudiendo llevarle a zonas de operación no lineales y con sensibilidad mínima [2.21]–

[2.23]. Esto se puede observar en detalle en el gráfico de la Fig. 2.8 en donde se muestra el ejemplo de la respuesta de un sensor con cavidad FP de baja *finesse* y se detalla la zona cuasi-lineal de operación en el sensor.

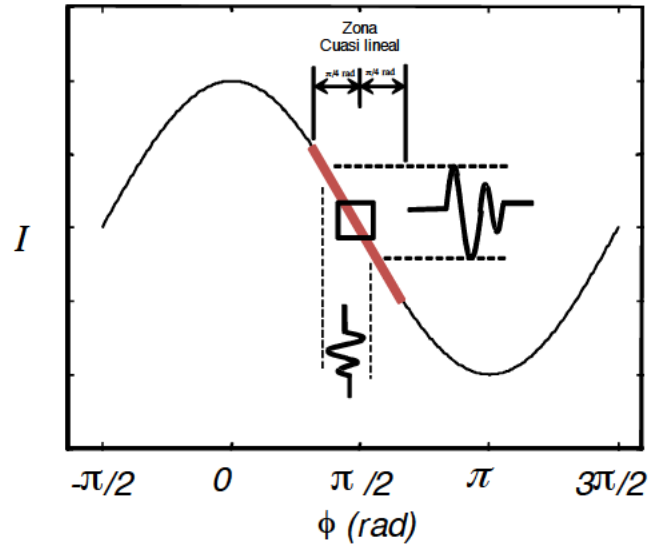


Figura 2.8. Principio de funcionamiento de la estabilización activa.

La estabilización activa se realiza por medio de un lazo de realimentación que actúa sobre la fuente de luz láser con el fin de modificar su longitud de onda (ec. 2.2) y de esta forma situar el punto de operación en una zona cuasi-lineal y con máxima sensibilidad (Fig. 2.8). La estabilización activa también se emplea en otro tipo de interferómetros diferentes al FP para compensar derivas de temperatura y perturbaciones de baja frecuencia, como se verá más adelante en los apartados 2.3.2 y 2.3.3.

2.3.1.2 Características del sensor

Una de las características que destaca en los sensores FP es su alta sensibilidad. En el caso particular de los sensores FP para detección de DP la sensibilidad de la membrana es del orden de nm/kPa; en ensayos experimentales se han reportado sensibilidades en la membrana de 3,5 nm/kPa a una frecuencia de resonancia de ~ 200 kHz [2.24]. Aunque el desplazamiento de la membrana por unidad de presión es reducido, la detección interferométrica permite observar cambios extremadamente pequeños de la longitud de la cavidad, del orden de picómetros, por lo que se pueden obtener resoluciones en el orden de decenas de Pascales.

También se han diseñado otro tipo de sensores FP en los que la cavidad se forma dentro de la propia fibra óptica (sensor FP intrínseco) con el objetivo de detectar EA de DP. El gráfico de la Fig. 2.9 muestra un esquema de este tipo de sensor.

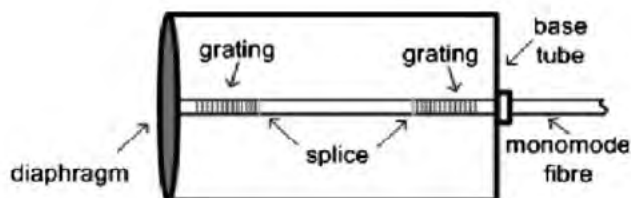


Figura 2.9. Esquema de un sensor FP intrínseco [2.25].

En un sensor FP intrínseco la cavidad está formada en la propia fibra óptica a partir de dos reflectores construidos con redes de Bragg. La EA produce una deformación en el tramo de fibra que conforma la cavidad FP y cambia la longitud de la misma. Con este tipo de sensores se ha reportado una resolución de 800 Pa @ 22 kHz [2.25]. La resolución no es tan buena como la conseguida con los sensores FP de cavidad extrínseca debido a que la sensibilidad del sensor depende de la capacidad de la membrana para transferir la energía de la onda acústica a la fibra óptica y también de las propias características mecánicas de la fibra óptica. Con este mismo tipo de sensores también se han probado otras aproximaciones en las que, en vez de inducir la deformación en la cavidad FP de fibra a través de una membrana (Fig. 2.9), se emplea un carrete de teflón al cual se encuentra adherido el segmento de FO que compone la cavidad [2.26]. En este tipo de configuraciones se aumenta la sensibilidad, sobre todo cuando se emplean carretes de materiales plásticos, ya que las características de estos materiales (módulo de Young y coeficiente de Poisson) favorecen una mayor deformación como respuesta a la presión acústica [2.27]. En la caracterización de este sensor con señales acústicas de 10 kHz [2.26] se reportó una sensibilidad de -240 dB re $V_{\text{rms}}/\mu\text{Pa}$ ($1 \mu\text{V}/\text{Pa}$) y una resolución de 320 Pa.

Por otra parte, como se mencionó en el apartado anterior, la respuesta en frecuencia de los sensores FP con membrana depende de la frecuencia de resonancia de la propia membrana. En este sentido, se pueden encontrar variedad de sensores FP para la detección de DP con frecuencias de resonancia diferentes desde los 90 kHz hasta aproximadamente 300 kHz [2.18]–[2.20], [2.24], [2.28]. En cuanto a la directividad, se

han publicado resultados de $\pm 30^\circ$ para una de estas sondas a una frecuencia de 230 kHz [2.18].

Los sensores FP se han probado en experimentos de DP generadas con alta tensión en aceite de transformador [2.29], [2.30] y en instalaciones de transformadores de potencia [2.31]. En ambos casos se lograron detectar EA de DP. Sin embargo, una particularidad de estos sensores es que la cavidad FP al estar llena de aire se convierte en un fallo potencial en el aislamiento y por tanto en una fuente de DP en sí misma. Por tal razón, se ha dedicado un cuidado especial a este aspecto al construir un nuevo sensor cuya cavidad FP se puede llenar con hexafluoruro de azufre (SF_6) [2.32], un gas dieléctrico que se utiliza comúnmente en la industria eléctrica. Para llenar la cavidad FP se incorpora una fibra óptica especial en el sensor, la cual contiene dos conductos dentro del revestimiento (*cladding*) que van desde el exterior hasta la cavidad FP. Además, para insuflar el gas dentro de la cavidad se necesita un sistema de inflado que incluye una bomba de vacío aplicada a la cavidad, la cual se llena posteriormente con SF_6 a presión. Por tanto, la fabricación de este tipo de sensor es aún más compleja que las primeras versiones.

La localización de fuentes de EA es otro de los aspectos importantes dentro del estudio realizado en este capítulo, ya que ésta es una de las ventajas fundamentales de la detección acústica. En este sentido, si bien es cierto que se ha llegado a localizar fuentes de EA con sensores FP [2.33], [2.34], la localización dentro de un entorno como el interior de un transformador presenta el inconveniente de la deriva del punto de operación del sensor por causa de la presión estática, lo cual, como se mencionó anteriormente en el esquema de la Fig. 2.8, se compensa utilizando una estabilización activa. Sin embargo, en un sistema de instrumentación con varios sensores, la estabilización activa implica la implementación de varios lazos de realimentación (uno por cada sensor) y también de varias fuentes de luz sintonizables, por lo que un sistema con varios sensores FP y estabilización activa puede llegar a ser costoso y complejo si se tiene en cuenta que se necesitan al menos cuatro sensores/lazos para llegar a localizar las fuentes de EA en 3D. Además, la labor que requiere la sintonización de cada uno de los lazos de realimentación implica un esfuerzo adicional. Una alternativa que se ha probado es la de remplazar la fuente de luz sintonizable por algo equivalente que es una fuente de luz de amplio espectro y un filtro óptico sintonizable [2.35]. Esto trae como ventaja la posibilidad de

utilizar una fuente de luz de coste más bajo como puede ser p. ej. un SLED; no obstante, de cara a un sistema multicanal, aunque se utilice una sola fuente de luz y varios filtros sintonizables, los múltiples lazos de control y su sintonización siguen representando una dificultad.

Recientemente se ha desarrollado un sistema multicanal de FO para la detección y localización de DP con sensores FP, en el cual se consigue una lectura interferométrica en cuadratura de cada sensor iluminando el sistema con dos longitudes de onda [2.36]. El esquema de este sistema se muestra en la Fig. 2.10.

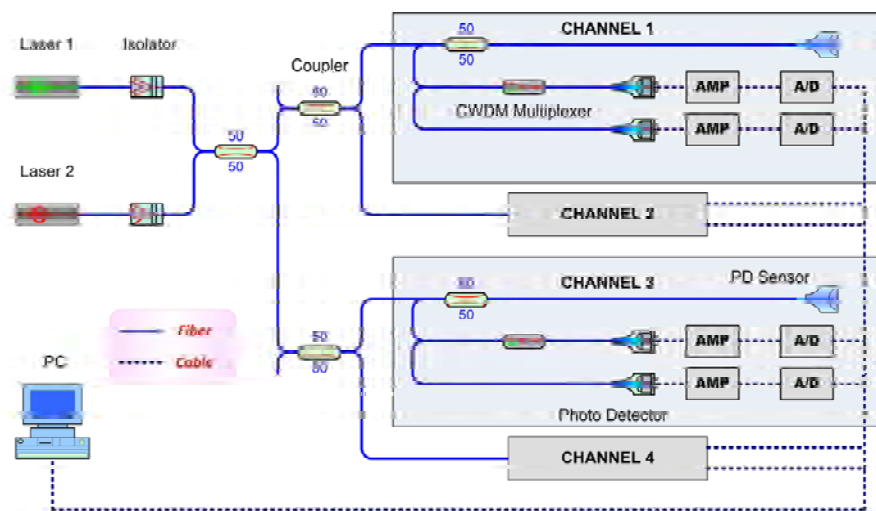


Figura 2.10. Sistema de instrumentación multicanal con sensores FP y detección interferométrica en cuadratura [2.36].

La aproximación que utiliza el esquema multicanal de la Fig. 2.10 emplea dos fuentes de luz cuyas longitudes de onda centrales (λ_1 y λ_2) se encuentran separadas de tal forma que al iluminar la cavidad FP de un sensor, las señales de interferencia correspondientes a cada λ se encuentran desfasadas $\pi/2$ rad; es decir, se encuentran en cuadratura. De esta forma se obtiene el seno y coseno del ángulo de fase, el cual se recupera posteriormente a través de la función arcotangente una vez que se digitalizan las señales de cada fotodetector. La separación de las dos λ en el sistema de FO se realiza previamente a la fotodetección utilizando un demultiplexor CWDM.

Con la implementación de este sistema se obtienen dos ventajas importantes con respecto a otras aproximaciones descritas anteriormente. La primera de ellas es que se elimina la necesidad de utilizar lazos de realimentación en el sistema multicanal y la

segunda, es la ampliación en el rango de medida de los sensores. Con esta aproximación se ha demostrado que se puede llegar a medir EA en un entorno con una presión estática de hasta 5,8 MPa.

2.3.2 Sensores interferométricos de fibra óptica

2.3.2.1 Principio de funcionamiento

Un sensor interferométrico de FO utiliza la propia fibra como elemento sensible. En este caso se va a hacer referencia al uso de la FO como brazo de un interferómetro de dos haces (Mach Zehnder o Michelson) y por tanto a la medida de la fase óptica. Por ello también se denominará sensor interferométrico de FO, aunque otros sensores como el FP también sean interferométricos. Este tipo de sensores se componen de un tramo de fibra de cierta longitud, el cual se encuentra expuesto a la magnitud de medida (Fig. 2.11), que en el caso de las EA es el campo acústico. La influencia de la magnitud de medida (m) sobre la FO modula la luz que se propaga a través de ella cambiando parámetros como p.ej. la fase óptica (ϕ), entre otros [2.37].

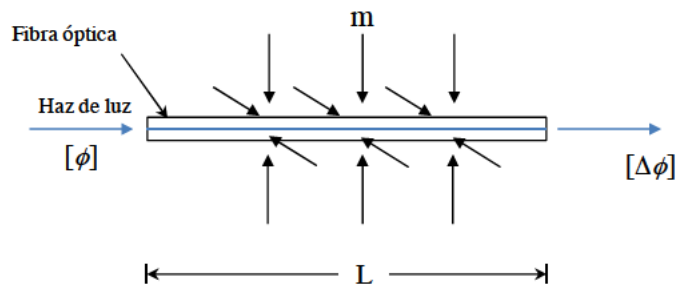


Figura 2.11. Sensor interferométrico de FO.

En un sensor interferométrico de FO diseñado para la medida acústica de DP el parámetro de detección que se utiliza normalmente es la fase óptica, la cual está determinada como:

$$\phi = \beta L = \frac{2\pi n}{\lambda} L \quad (2.4)$$

donde β es la constante de propagación, n es el índice de refracción efectivo de la FO, L es la longitud del tramo de FO y λ es la longitud de onda de la luz que recorre la FO. La

sensibilidad a la presión $\Delta\phi/\Delta P$ que tiene un tramo de FO de longitud L fue estudiada por Hocker [2.38] y está determinada como:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta P} = \frac{(1-2\nu)}{E} \left[\frac{n^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) - 1 \right] \phi \quad (2.5)$$

donde E y ν son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson de la fibra respectivamente y p_{11} , p_{12} son elementos del tensor elasto-óptico. Como se puede observar en la parte derecha de la ec. (2.5), debido al término ϕ , la sensibilidad resulta directamente proporcional a la longitud de fibra expuesta a la magnitud de medida y también inversamente a la longitud de onda de la luz que recorre la FO.

Para extraer la medida que se encuentra codificada en la fase óptica normalmente se emplean interferómetros de fibra óptica, lo que permite obtener una medida de alta resolución [2.39]. Para este fin típicamente se emplean esquemas como el Mach Zehnder mostrado en la Fig. 2.12.

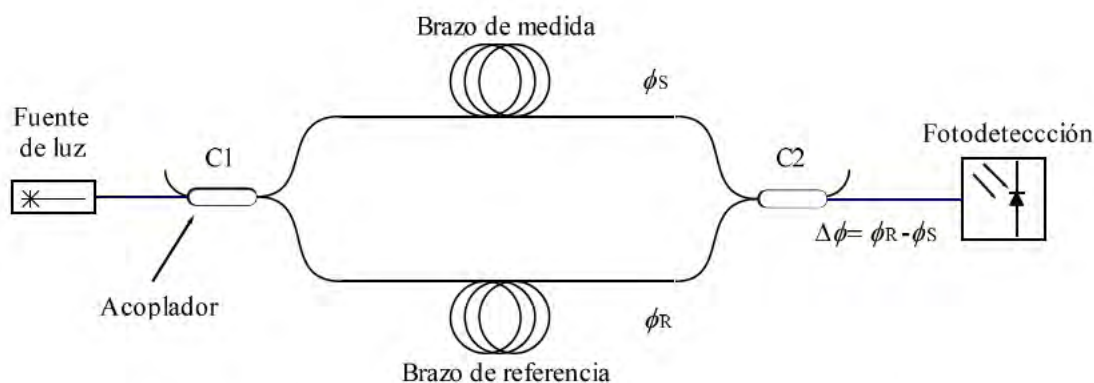


Figura 2.12. Esquema básico de un interferómetro Mach-Zehnder.

La recuperación de la fase óptica con un esquema como el de la figura anterior se consigue por medio de la interferencia que se produce entre la luz que recorre el brazo de referencia y la que viaja en el brazo de medida del interferómetro. Una vez que la luz de ambos brazos interfiere en c2 (Fig. 2.12) se obtiene en los fotodetectores la señal de interferencia, la cual se observa como una fotocorriente (I_{pd}) de la siguiente forma:

$$I_{pd} = \Re I_0 [1 + \eta \cos(\phi_e + \Delta\phi)] \quad (2.6)$$

donde \mathfrak{R} es la responsividad del foto-detector, I_0 es la intensidad media de la señal óptica en el detector y η es la visibilidad. Este último es un parámetro que determina el contraste de la señal de interferencia óptica. ϕ_e es la fase inicial de la señal y $\Delta\phi$ es la variación de fase que se produce por los cambios en uno de los brazos del interferómetro frente al otro.

Con un interferómetro se pueden llegar a medir deformaciones en los brazos de fibra del orden de $\sim 10^{-13}$ a 10^{-15} [2.39]. En esta gran resolución es donde radica el potencial de las medidas interferométricas y lo que hace que sean especialmente adecuados los sensores de FO interferométricos para la detección de EA de baja magnitud.

2.3.2.2 Características del sensor

Los primeros sensores intrínsecos de FO propuestos para la detección acústica de DP fueron construidos utilizando 100 m de fibra enrollada en una bobina cilíndrica [2.40] La evolución de estos sensores no ha tenido cambios significativos en cuanto a la forma del sensor, todas las versiones tienden a ser en forma de bobina ya que esta geometría permite enrollar grandes cantidades de fibra de forma compacta, lo que permite ajustar la sensibilidad manteniendo un tamaño moderado. Posiblemente el cambio más relevante presente en las versiones más recientes de estos sensores es la cantidad de FO utilizada para la construcción de la sonda, la cual se reduce a entre 10m y 20m.

La construcción de estos sensores es más sencilla que la de otros tipos de sensores propuestos para la aplicación, por lo que se puede generalizar su uso a un coste considerablemente más bajo. Por otra parte, como desventaja, pueden llegar a ser voluminosos si la cantidad de fibra necesaria para construir el sensor llega a ser excesiva e incluso dejar de comportarse como un sensor localizado. En el caso de la aplicación en transformadores, es deseable un tamaño reducido debido a que facilita el acceso al interior del tanque transformador y por tanto, también la instalación final.

En cuanto al interferómetro de FO empleado para recuperar la medida, se destaca el hecho de que entre los reportados en la bibliografía la mayoría emplean fuentes de luz con longitudes de onda corta, lo cual, como se puede observar en las ec. (2.4) y (2.5), favorece la sensibilidad. Entre los sensores desarrollados para esta aplicación predominan longitudes de onda de 633 nm [2.40]–[2.43], típicas de un láser de He-Ne, aunque también se pueden encontrar sistemas implementados a 830 nm [2.44] y algunos con

longitudes de onda más largas, de las que se utilizan comúnmente en sistemas de telecomunicación, como p. ej. 1550 nm [2.45].

En el caso particular de la medida de EA de ultrasonido, la información de la medida se encuentra contenida en los cambios dinámicos de fase óptica. Si se pretende detectarlos directamente en la señal de interferencia, debe eliminarse el efecto de las perturbaciones de baja frecuencia como p. ej. las producidas por cambios de temperatura. Al igual que sucede con los sensores FP anteriormente descritos, las derivas de temperatura pueden llevar el punto de operación del sensor a una zona no lineal y de mínima sensibilidad. Para solventar este inconveniente, un esquema que se utiliza comúnmente es el de un interferómetro de Mach-Zehnder con estabilización del punto de trabajo y detección homodina activa [2.46]. Con este tipo de esquema (Fig. 2.13) se logra mantener el punto de operación del interferómetro en la zona lineal y con máxima sensibilidad. Esto se consigue a través de un lazo de realimentación que actúa sobre un modulador de fase ubicado en su brazo de referencia. El modulador de fase puede ser un dispositivo tan simple como un tramo de fibra embobinado sobre un actuador piezoeléctrico, el cual induce una deformación sobre la FO a fin de modular la fase óptica.

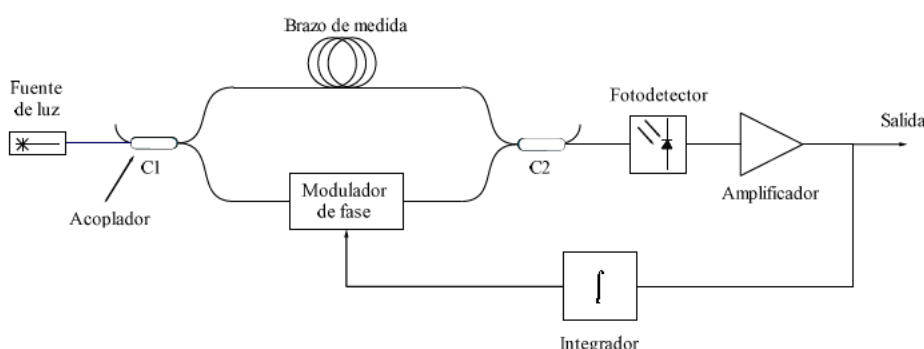


Figura 2.13. Interferómetro Mach-Zehnder con estabilización y detección homodina activa.

Los sensores interferométricos de FO han sido probados tanto en el interior de transformadores para la medida de otras magnitudes, p. ej. las vibraciones [2.47]–[2.49], como también en bancos de prueba de alta tensión en los que se generan descargas en aceite de transformador [2.40], [2.44], [2.50], en donde han mostrado tener suficiente sensibilidad para detectar las EA generadas por las DP. La resolución reportada por un sistema interferométrico tipo Mach-Zehnder en el que se utiliza una sonda construida con 10,5 m de FO es del orden de 10 Pa [2.44]. También se ha estudiado la directividad de

esta sonda [2.51], la cual está construida en forma de bobina con diámetros interior y exterior de 11 mm y 14 mm respectivamente y una altura de 3,1 mm. Los resultados de la caracterización muestran que ante EA de 150 kHz el sensor presenta una directividad de $\pm 30^\circ$. La respuesta en frecuencia de este tipo de sensores de FO abarca un rango amplio en la banda de ultrasonidos. Pueden detectar con diferentes sensibilidades señales acústicas desde 20 kHz hasta varios megahercios [2.52], [2.53], por lo que de cara a la aplicación, es necesario acotar su respuesta por medio de filtrado electrónico.

Recientemente se ha probado otra aproximación con un sensor de FO en una configuración interferométrica tipo Sagnac [2.54]. En este se utiliza una sonda de medida construida con una gran cantidad de fibra (1 km) enrollada en forma de bobina, por lo que resulta voluminosa. Además, algunas de las características más importantes analizadas dentro de este capítulo no se encuentran reportadas, por lo que este tipo de sensor queda fuera del alcance de este estudio.

Por otra parte, cabe referirse a la medida simultánea con varios sensores a fin de localizar fuentes de DP. Aunque la técnica de estabilización homodina (Fig. 2.13) es muy práctica para un sistema con un solo sensor, una implementación con varios sensores presenta ciertas dificultades asociadas a los múltiples lazos de realimentación y su sintonización, por lo que esta técnica resulta una opción inapropiada. Si bien la multiplexación con este tipo de sensores ha sido muy estudiada y existe un conocimiento amplio acerca de la misma [2.55], [2.56], no han sido reportados sistemas de instrumentación multicanal con sensores intrínsecos de FO para esta aplicación en particular. Las técnicas de multiplexación de uso más extendido son por división temporal (TDM), por división de la longitud de onda (WDM) y por división en frecuencia (FDM). No obstante, ninguna de ellas resulta atractiva de cara a su implementación para esta aplicación en particular, debido sobre todo a que las señales que se desean detectar son ráfagas de corta duración y también debido al rango de frecuencias de interés asociado a las EA producidas por las DP. Una topología en particular que resulta interesante para la implementación de un sistema de instrumentación con varios sensores intrínsecos de FO es la de un interferómetro de Mach-Zehnder con múltiples brazos de medida en paralelo y un brazo de referencia común. Esta ha sido probada en un sistema de instrumentación con cuatro sensores en donde se demostró su viabilidad para la

medida de magnitudes dinámicas [2.57]. El esquema básico de esta topología es el que se muestra en la Fig. 2.14.

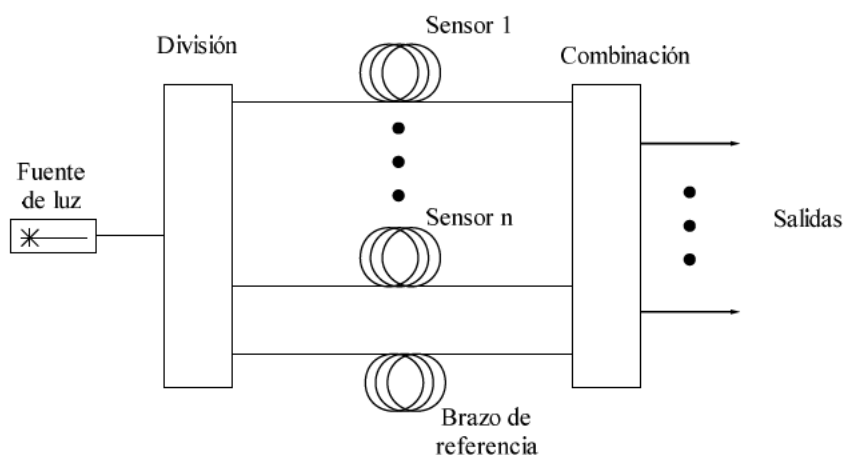


Figura 2.14. Esquema de un sistema interferométrico Mach Zehnder multicanal con brazos de medida en paralelo y brazo de referencia común.

En el esquema anterior se puede observar que el interferómetro posee un solo brazo de referencia que es común para todos los sensores de FO. De esta forma se simplifica el sistema de tal forma que no llega a ser excesivamente complejo para un número moderado de sensores (entre 4 y 8), como el necesario en este caso para la localización. Además, la recuperación de la medida se trata de forma independiente para cada sensor, por lo que no es necesario realizar una demultiplexación para separar previamente la información de cada canal.

El esquema de la Fig. 2.14 es, además, compatible con otras técnicas de detección de la fase óptica diferentes a la estabilización homodina, como son las basadas en la recuperación de la fase sobre una señal portadora de radiofrecuencia. En este caso la información de la medida se codifica en la fase de la señal portadora y posteriormente se recupera por medio de una demodulación de fase. Esto ofrece una ventaja significativa adicional en comparación con la estabilización homodina, que es la ampliación del rango de medida, ya que es posible recuperar cambios de fase mayores que 2π rad con la ayuda de técnicas digitales de demodulación [2.58]–[2.61].

2.3.3 Sensores basados en redes de Bragg inscritas en fibra óptica (FBG)

Las redes de Bragg son elementos inscritos en el núcleo de una FO que presentan una reflectividad en una porción del espectro óptico [2.62], de tal forma que reflejan unas longitudes de onda y permiten la transmisión de otras en la FO. Las FBG, en su forma más básica, consisten en una modulación periódica del índice de refracción (n) del núcleo de la FO, tal y como se puede observar en la Fig. 2.15.

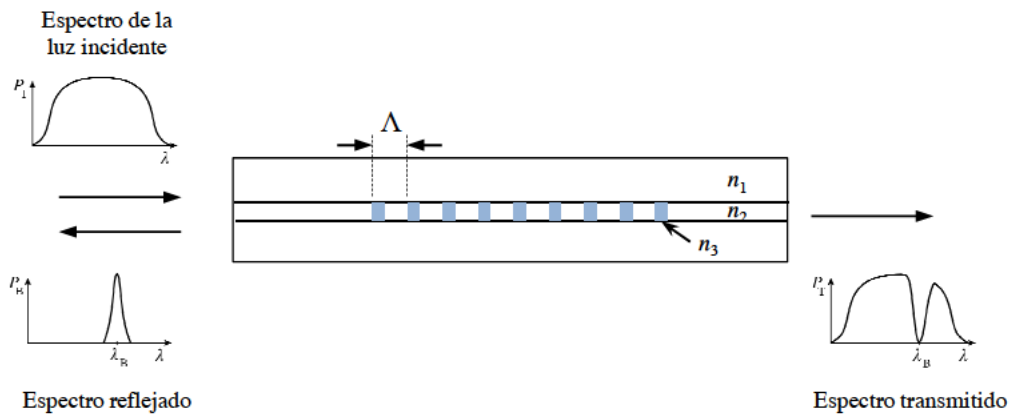


Figura 2.15. Estructura de una red de Bragg en fibra óptica.

La longitud de onda central (λ_B) reflejada por la FBG, también llamada longitud de onda de Bragg, depende del espaciamiento periódico (Λ) en la FBG de la forma:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2.7)$$

donde n es el índice de refracción efectivo del núcleo de la FO. Un sensor de FO basado en FBG aprovecha los cambios de λ_B que se producen como resultado de exponer la FBG a la influencia de una magnitud física como lo puede ser la temperatura o la deformación.

En un sensor FBG para medida acústica, las variaciones de presión de las ondas acústicas (ΔP) inducen una deformación en la FBG que produce un cambio en la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$). La sensibilidad a la presión $\Delta\lambda_B/\Delta P$ en una FBG está determinada por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta P} = \left[-\frac{(1-2\nu)}{E} + \frac{n^2}{2E}(1-2\nu)(2p_{12} + p_{11}) \right] \lambda_B \quad (2.8)$$

donde E y ν son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson de la fibra respectivamente y p_{11} , p_{12} son elementos del tensor elasto-óptico. La sensibilidad a la presión $\Delta\lambda_B/\Delta P$ de una FBG dopada con germanio a $1,55 \mu\text{m}$ fue medida con el resultado de $-3 \times 10^{-3} \text{ nm/MPa}$ dentro de un rango de 70 MPa [2.63]. La sensibilidad de los sensores FBG, al igual que en el caso de los sensores interferométricos de FO, también puede incrementarse, bien sea recubriendo la FO con materiales plásticos, o montándola sobre estructuras de diversas geometrías a modo de amplificador mecánico [2.64].

En comparación con otro tipo de sensores de FO, los sensores basados en FBG presentan algunas ventajas entre las que se destacan la posibilidad de obtener medidas absolutas, una gran capacidad de multiplexación y un tamaño reducido, lo que ha permitido p. ej. el desarrollo de sensores embebidos [2.65].

2.3.3.1 Principio de funcionamiento

El sensor de FO basado en FBG para la detección de DP ha sido propuesto por un grupo de investigadores de INESC - Porto (2012) [2.66]. El elemento sensible en este sensor es una *phase-shifted chirped* FBG (PS-CFBG), la cual se encuentra sujeta a un carrete cilíndrico construido con policarbonato a fin de incrementar la sensibilidad y adecuar la respuesta en frecuencia a la aplicación. El esquema de instrumentación empleado para la medida con este tipo de sensor es el que se muestra en la Fig. 2.16.

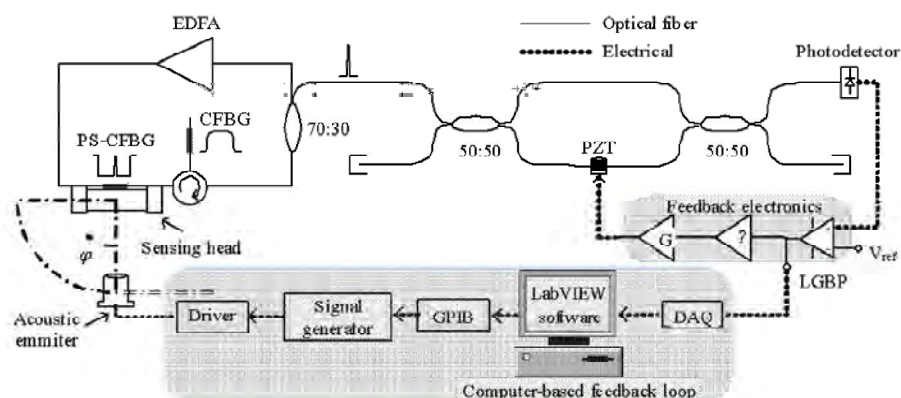


Figura 2.16. Sistema de instrumentación para la medida de EA generadas por DP con sensor FBG [2.66].

La sonda de FO en la que se encuentra la PS-CFBG forma parte de un láser en anillo (*Ring Laser*, RL) que está conformado por un amplificador óptico (EDFA), un acoplador 70:30, un circulator, la sonda de FO y una segunda CFBG ubicada en el tercer puerto del

circulador. La respuesta espectral de la PS-CFGB en transmisión presenta un pico ultra estrecho, con una anchura de 20 pm, mientras que la CFGB-2 presenta una respuesta igual pero sin este pico central de transmisión (Fig. 2.16). La configuración de este tipo de RL permite obtener a la salida una emisión láser con un espectro ultra estrecho, con anchura de línea entre 1 kHz y 10 kHz [2.67], [2.68]. Las variaciones de presión de las EA sobre la sonda de FO inducen una deformación en la PS-CFGB que modifican la longitud de onda de su pico central de transmisión y como consecuencia, se obtendrá un cambio en la longitud de onda del RL que será detectado posteriormente por un interferómetro Mach-Zehnder de FO (Fig. 2.15 derecha). El esquema interferométrico empleado para detectar el cambio de longitud de onda del láser en anillo es igual al descrito anteriormente en el apartado 2.3.2.2, Fig. 2.13. Se trata de un interferómetro Mach-Zehnder de FO en el que se realiza una estabilización homodina activa utilizando un lazo de realimentación que actúa sobre un modulador de fase ubicado en uno de los brazos del interferómetro.

2.3.3.2 Características del sensor

En la caracterización de este sensor se reporta una sensibilidad de -165 dB re $V_{\text{rms}}/\mu\text{Pa}$ ($5,6$ mV/Pa) a una frecuencia de 150 kHz. Aunque hasta el momento el sensor no ha sido probado con EA de DP reales generadas en aceite de transformador, la resolución alcanzada por el sistema de instrumentación es, en principio, adecuada para detectar dichas EA. La resolución reportada por este sistema es ~ 10 Pa.

El diseño del carrete de policarbonato que forma parte de la sonda de FO esta optimizado para obtener una respuesta en frecuencia entre 100 kHz y 250 kHz, presentando un pico de resonancia en torno a 150 kHz. Las dimensiones del carrete son: 20 mm de largo, 10 mm de diámetro exterior y 9 mm de diámetro interior. La directividad de esta sonda de FO a su frecuencia de resonancia es de $\pm 30^\circ$.

Por otra parte, en cuanto a la localización de fuentes de DP con sensores FBG, hasta el momento no hay trabajos de investigación publicados relacionados con un sistema multi-sensor construido específicamente para este fin.

Entre la bibliografía relacionada con sensores de FO en configuración RL diseñados para otras aplicaciones, se pueden encontrar varias topologías de sistemas multiplexados.

En una de ellas se logra integrar varios sensores FBG dentro de un solo RL en el cual se generan las longitudes de onda que corresponden a cada sensor [2.69]. Esta característica simplifica en gran medida el esquema multiplexado; no obstante, estos carecen de las altas prestaciones necesarias para la detección de EA de ultrasonidos, debido a que la competencia entre los múltiples modos que conviven en la cavidad trae como consecuencia inestabilidades en RL. Recientemente se ha demostrado un sistema multiplexado de altas prestaciones para la medida de ultrasonidos con sensores FBG [2.70]. Este sistema utiliza sensores FBG en una configuración con RL. A diferencia de los otros sistemas multiplexados mencionados anteriormente, este utiliza un RL por cada sensor FBG con el fin de evitar los inconvenientes que acarrea el generar varios modos dentro un solo RL. El esquema se muestra en la Fig. 2.17.

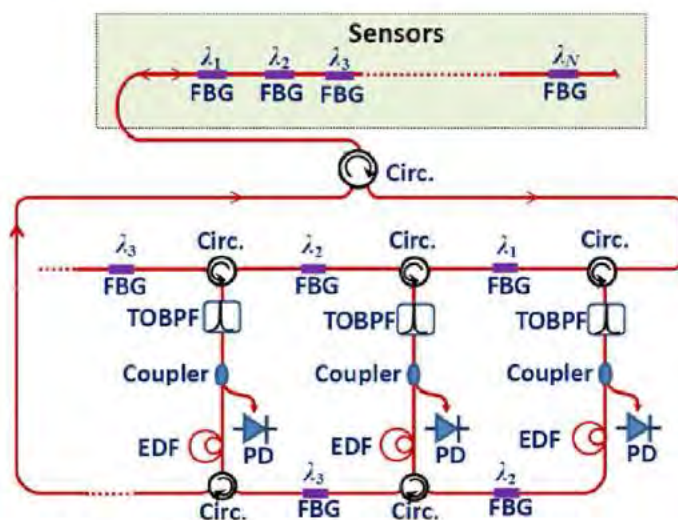


Figura 2.17. Sistema de FO multiplexado para la medida de ultrasonidos con sensores FBG [2.70].

El diseño del esquema multiplexado utiliza una sonda con varios sensores FBG en serie, los cuales se encuentran operando en reflexión. El esquema no es sencillo y además las EA que se han logrado medir a frecuencia de 200 kHz son del orden de ~ 2 kPa con sensores FBG instalados sobre una placa de aluminio.

Este sistema no ha sido diseñado para la medida acústica de DP, por lo que sus prestaciones están lejos de alcanzar las necesarias para dicha aplicación. No obstante, potencialmente tienen margen de mejora, p. ej. acondicionando el sistema de la figura 2.17 con una detección interferométrica.

De cara a la medida de EA de DP en transformadores, un sistema de este tipo en el que todos los sensores se encuentran en una sola línea de FO puede tener como ventaja una instalación más sencilla, ya que solo se necesitaría de una vía de acceso al tanque del transformador para instalar todos los sensores. Por otro lado, como desventaja presenta que, a pesar de la capacidad de multiplexación que proporciona el propio funcionamiento del sensor (modulación de la longitud de onda), la implementación de un sistema multiplexado en este caso no resulta sencilla. Además, la incorporación de componentes como el EDFA en cada uno de los RL, hacen que la implementación de un sistema con múltiples canales pueda llegar a ser costosa.

2.4 Discusión

Antes de comenzar la discusión se presenta un resumen de las características más relevantes de los sensores estudiados en este capítulo, el cual se recoge en la tabla 2.2.

Características	Fabry-Perot de baja <i>finesse</i>	FBG	Interferométrico de FO*
Resolución	~10 Pa - 20 Pa	~10 Pa	1 Pa
BW	90 kHz – 300 kHz	100 kHz – 300 kHz	100 kHz – 300 kHz
Frec. Resonancia	90 kHz – 300 kHz	150 kHz	150 kHz
Directividad	$\pm 30^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 30^\circ$
Tamaño sonda	< 1 cm	carrete cilíndrico 1 cm \varnothing ; 2cm largo	Bobina de FO \varnothing entre 1 cm – 3 cm
Fabricación	MEMS	<i>Phase Shifted Chirped FBG</i>	Bobina de FO
Multiplexación	Complejo	Costoso	Factible
* Resultados logrados en esta investigación para la tesis doctoral			

Tabla 2.2. Resumen de las características de diferentes sensores de FO para la detección de DP

En primera instancia se destaca el hecho que los sensores basados en cavidades FP se encuentran en un estado de desarrollo más avanzado en comparación con los otros tipos de sensores. La revisión de la bibliografía relacionada refleja un esfuerzo considerable dedicado al desarrollo de este tipo de sensores y también al sistema de instrumentación para la medida de EA.

En general, los tres tipos de sensores presentan características bastante similares para su uso básico en un esquema de detección de EA en la aplicación. La resolución típica de estos sensores está comprendida entre 1 Pa y 10 Pa. De igual forma, aunque la respuesta en frecuencia es ligeramente diferente para algunos de ellos, en casi todos los casos presentan un pico de resonancia en torno a 150 kHz, frecuencia a la que normalmente se realiza la detección de las EA generadas por las DP. Sin embargo, existen diferencias significativas entre ellos en relación a otros aspectos como la complejidad de su construcción, el tamaño y la capacidad de implementación en sistemas multiplexados para la medida con varios sensores. Este último es particularmente importante debido a

que la detección multipunto de EA es fundamental para la localización de fuentes de DP en los transformadores de potencia.

En cuanto a lo relacionado con los sistemas multiplexados, de forma simultánea con esta investigación se ha propuesto un sistema multi-sensor con FP para la aplicación de detección acústica de DP (Fig. 2.10) [2.36]. Éste utiliza dos longitudes de onda para iluminar el sistema con el fin de obtener una detección en cuadratura de la señal de interferencia.

Es bien conocido que una de las ventajas principales de los sensores basados en FBG es su gran capacidad de multiplexación. Sin embargo, la topología en RL de los sensores FBG para la detección acústica de DP dificulta la implementación de un sistema multiplexado. Además, éste puede ser costoso debido a componentes como el EDFA, necesarios en cada uno de los sensores. Aun así, esta topología puede llegar a ser viable y práctica para otras aplicaciones. El esquema multiplexado mostrado en la Fig. 2.17 ha sido propuesto recientemente para la medida de ultrasonidos con sensores FBG en configuración RL [2.70]. Los resultados mostrados en la medida de ultrasonidos con múltiples sensores son prometedores, pero sus prestaciones están aún muy lejos de las necesarias para la detección acústica de DP.

Las fibras de polímero presentan mayor sensibilidad acústica. En la detección de ultrasonidos con FBG en fibras de polímero microestructuradas se ha demostrado mayor sensibilidad y rango de medida [2.71]. No obstante, de cara a la aplicación, es necesario estudiar la influencia que puede tener sobre este tipo de sensores la temperatura y otros factores presentes en el entorno de medida.

Por otra parte, aunque los sensores interferométricos de FO han sido estudiados en profundidad durante mucho tiempo y hay un gran conocimiento acerca de su uso en esquemas multiplexados, no ha sido reportado en la bibliografía un sistema multicanal para la detección acústica y localización de DP con este tipo de sensores. En este trabajo de investigación se propone un sistema interferométrico basado en una topología Mach-Zehnder con múltiples brazos de medida en paralelo y un brazo de referencia común para esta aplicación. Esta aproximación tiene un potencial importante, sobre todo si se considera en conjunto con una detección de fase sobre una señal portadora, en cuyo caso

el esquema de FO de este sistema de instrumentación es el que se observa de forma simplificada en la Fig. 2.18.

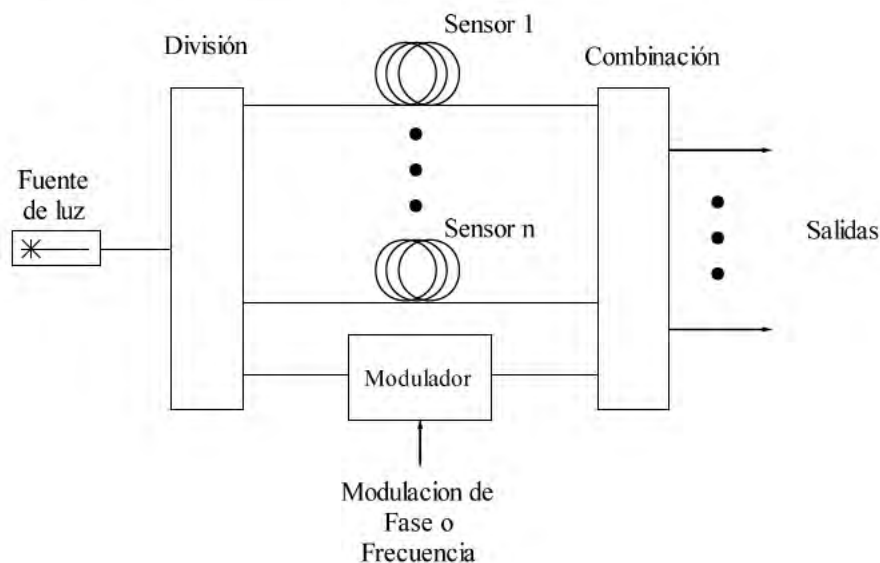


Figura 2.18. Esquema propuesto de un sistema multicanal con sensores interferométricos de FO y detección de fase sobre una señal portadora.

Algunas de las ventajas que se obtienen con este esquema en comparación con otros en donde se implementa una estabilización homodina (Fig. 2.13) son el incremento del rango de medida y la eliminación de lazos de realimentación. Esta última simplifica en gran medida un esquema con varios sensores.

No se ha publicado antes ningún sistema como el propuesto en la Fig. 2.18 para la medida de EA de ultrasonido, ni para la aplicación de detección acústica de DP y su localización. Por lo tanto, se considera que esta propuesta es una de las contribuciones principales de este trabajo de investigación y un avance en la detección de DP.

Capítulo 3

Diseño de un sensor intrínseco de fibra óptica para la detección acústica de descargas parciales

3.1 Introducción

La detección acústica de DP desde el interior de un transformador representa un gran reto debido al entorno hostil al que será sometido el sensor y a las bajas magnitudes acústicas que presentan las EA de las DP. Es por esta razón que los sensores utilizados para este fin emplean tecnologías ópticas, las cuales, los hacen inmunes a las interferencias electromagnéticas (EMI) a las que estarán sometidos en ese entorno. Además, la alta sensibilidad y resolución que se necesita para detectar los bajos niveles de señal acústica hacen de los sistemas interferométricos de acondicionamiento y lectura de fase la opción más apropiada para esta aplicación.

En el presente capítulo se presenta el desarrollo completo de un sensor de FO preparado para la detección de ultrasonidos que provienen de las DP. Asimismo, se presenta la caracterización del sensor, la cual ha sido realizada en una plataforma de ensayos acústicos en la que se reproducen EA de ultrasonido similares a las producidas por las DP.

3.2 Principio de funcionamiento del sensor

Las EA son ondas de presión que se propagan en un medio elástico. Como se mencionó anteriormente en el capítulo 2, el principio de funcionamiento de un sensor interferométrico de FO para la medida de EA se basa en la variación del camino óptico recorrido por la luz como resultado de las variaciones de presión a las que se somete la FO. Tomando la fase óptica en la ec. (2.4) y derivando se obtiene que la variación de fase $\Delta\phi$ fase será:

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \beta\Delta L + L\Delta\beta \\ &= \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2\end{aligned}\quad (3.1)$$

El primer término en la expresión anterior representa el cambio de fase debido la deformación de la fibra en el eje axial y es igual a:

$$\Delta\phi_1 = -\frac{\beta L}{E}(1-2\nu)\Delta P \quad (3.2)$$

donde ν es la constante de Poisson, E es el módulo de Young y ΔP son los cambios de presión acústica.

El segundo término en la ec. (3.1) es el cambio en la constante de propagación que se produce debido del cambio en el índice de refracción (efecto elasto-óptico) y también al cambio en diámetro de la fibra como consecuencia de la deformación. No obstante, el cambio en el diámetro de la fibra se puede considerar despreciable [3.1], [3.2]; por tanto, $\Delta\phi_2$ puede escribirse como:

$$\Delta\phi_2 = \frac{\beta L n^2}{2E}(1-2\nu)(p_{11} + 2p_{12})\Delta P \quad (3.3)$$

donde p_{11} y p_{12} son elementos del tensor elasto-óptico. Así, substituyendo las ec. (3.2) y (3.3) en (3.1) se obtiene:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi\Delta P} = \frac{(1-2\nu)}{E} \left[\frac{n^2}{2}(p_{11} + 2p_{12}) - 1 \right] \quad (3.4)$$

el termino $\Delta\phi/(\phi\Delta P)$ es la sensibilidad acústica normalizada (NR) y se expresa en unidades de Pa^{-1} .

3.3 Diseño del sensor de fibra óptica

Para el desarrollo de este sensor interno de FO se desea reproducir algunas características específicas de los sensores externos usados comúnmente en la detección de DP, ya que estos son idóneos para la aplicación. Estas características son: una sensibilidad de 10 mV/Pa a una frecuencia de 150 kHz y un ancho de banda de detección comprendido entre 100 kHz y 300 kHz [3.3]. Además de estas características, se espera que las señales acústicas de las DP sean detectadas con una amplitud de entre 1 Pa y 10 kPa [3.4], [3.5]. Esto favorece a la propuesta de un sistema interferométrico para la extracción de la fase óptica, debido a la gran relación rango-resolución que pueden alcanzar este tipo de sistemas. No obstante, lo más importante en este caso es la resolución que se pueda obtener, la cual debe ser del orden de 1 Pa.

La sensibilidad que se desea obtener con este sensor es como la de un sensor externo modelo R15i, que es de 10 mV/Pa a una frecuencia de 150 kHz. Esto corresponde a -180 dB re $\text{rad}\cdot\mu\text{Pa}^{-1}$ (1×10^{-9} rad/ μPa) si se utiliza un sistema interferométrico con un rango de salida de 20 V para extraer la fase óptica del sensor. Bajo estas condiciones y tomando el valor de 20 V mencionado anteriormente como rango de salida en la zona cuasi-lineal de un interferómetro con estabilización homodina, el rango dinámico del sistema de medida sería de 2 kPa. Estos requerimientos serían apropiados y son tomados como las condiciones iniciales de diseño para el sensor.

Como se mencionó anteriormente, el diseño de la cabeza sensible está basado en una bobina de fibra óptica con una configuración en múltiples capas que serán sometidas a las emisiones acústicas. Debido a que la sensibilidad de fase es inversamente proporcional a la longitud de onda (λ) de la luz utilizada para iluminar el sensor, como se puede observar en la ec. 3.6, se selecciona una fibra óptica mono-modo a longitudes de onda corta para la construcción del sensor. La fibra utilizada para este fin es el modelo: SCSM-633-HP1 (StockerYale). Esta es una fibra recubierta de polímero curado y tiene un rango de operación de 532 nm - 760 nm. Una vez elegida la fibra se necesita saber qué cantidad será necesaria para construir el sensor y obtener la sensibilidad deseada. Para ello se realizó un cálculo simple utilizando la NR típica de las fibras recubiertas, la cual es de ≈ -330 dB re μPa^{-1} [3.6], y una longitud de onda de una fuente de luz adecuada para trabajar con la fibra elegida como p. ej. 633 nm, típica de un láser de He-Ne. Tomando

estos parámetros la fase óptica total (ec. 3.6) en 1 m de fibra corresponde a 143 dB re rad; por lo tanto, la sensibilidad será de -187 dB re rad $\mu\text{Pa}^{-1}\text{m}^{-1}$. Esto significa que para alcanzar la sensibilidad deseada de -180 dB re rad- μPa^{-1} se necesitarán ~ 2 m de fibra.

A pesar del resultado obtenido en cálculo anterior, debido a que el valor de la NR utilizado es aproximado y puede variar dependiendo de las características de la fibra, se decide realizar un experimento con el fin de conocer la sensibilidad de esta fibra en particular. La configuración experimental empleada para llevar a cabo estas medidas es la que se muestra en la Fig. 3.1a.

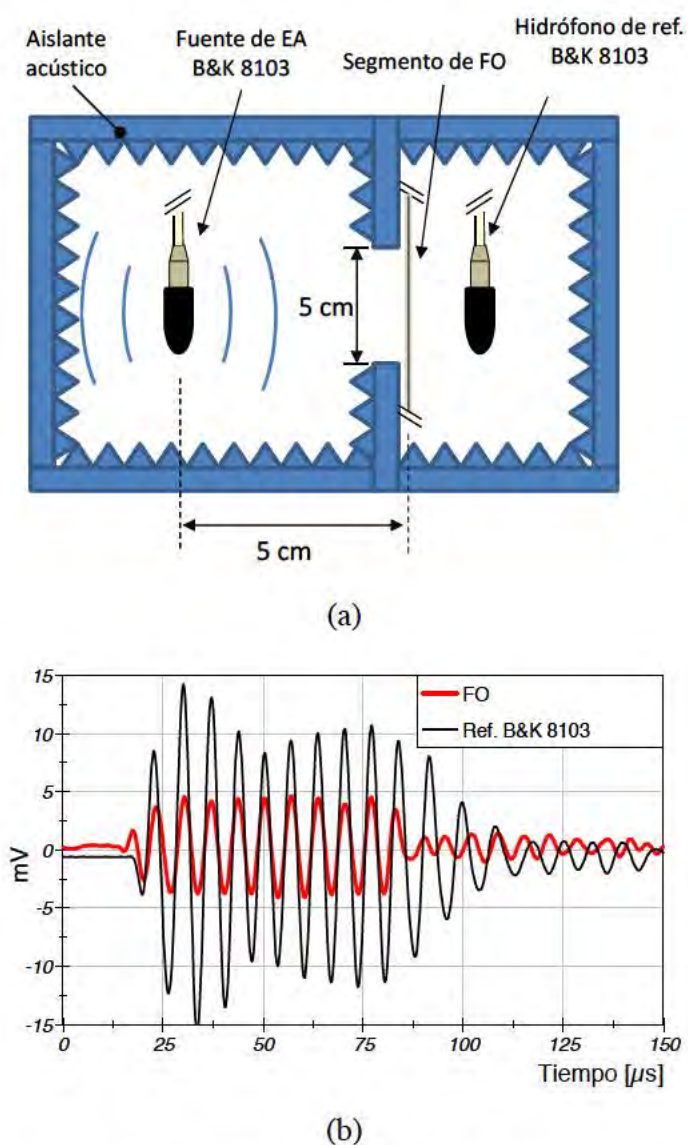


Figura 3.1. (a) Esquema de la configuración experimental utilizado para caracterizar la sensibilidad de un segmento de fibra óptica. (b) señal acústica de 150 kHz detectada simultáneamente con el segmento de FO y un hidrófono de referencia.

Este experimento se realiza en un esquema sumergido en agua, en el que se emiten ráfagas de ultrasonido con una frecuencia de 150 kHz, las cuales van a ser detectadas simultáneamente con un segmento de fibra óptica de una longitud conocida, de 5 cm, y con un hidrófono de referencia calibrado. Ambos, el hidrófono de referencia y el segmento de fibra, están ubicados a la misma distancia de la fuente de emisión acústica (5 cm). De esta forma, se puede monitorizar en todo momento la presión acústica que llega al segmento de fibra utilizando el hidrófono de referencia.

Para obtener la medida de fase del sensor de fibra se utilizó un interferómetro Mach–Zehnder con estabilización homodina activa y con un rango de salida de 12 V. Este interferómetro se utilizó también en la caracterización del sensor y se describe en detalle más adelante en el apartado 3.4.1.2.

El hidrófono de referencia está calibrado para obtener una sensibilidad de 200 $\mu\text{V}/\text{Pa}$ a una frecuencia de 150 kHz. Los resultados de la medida experimental de la sensibilidad acústica de la fibra a 150 kHz se muestran en la Fig. 3.1*b*.

En los resultados obtenidos del experimento de la Fig. 9*b* se observó que la emisión acústica de 100 Pa (20 mV en el hidrófono) se detecta con el segmento de fibra como 1.45×10^{-3} rad. Esto indica que la fibra tiene una sensibilidad de -190 dB re rad $\mu\text{Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; por consiguiente, la longitud de fibra necesaria para la construcción del sensor será de 3,2 m.

Antes de comenzar con la construcción del sensor hay un aspecto importante a tener en cuenta y que está relacionado con la sensibilidad a frecuencia deseada y con las dimensiones del sensor. Si se analiza la longitud de onda de una emisión acústica de 150 kHz de frecuencia, que viaja a través de aceite de transformador a una velocidad de propagación de 1400 m/s, se obtiene que esta es de ~ 10 mm. No obstante, el diámetro mínimo de la bobina de FO que se puede alcanzar con fibra convencional sin tener pérdidas excesivas de potencia óptica es de ~ 30 mm. Esto significa que las dimensiones del sensor serán mayores que la longitud de onda que se desea detectar; por lo tanto, existirá una diferencia de fase del campo acústico actuando sobre el sensor, lo que causará una reducción de la presión promedio en el sensor. Como consecuencia se tendrá una reducción de la longitud de fibra que aporta una sensibilidad neta, libre de promedio. Se estima que solo una cuarta parte del sensor aporta una sensibilidad neta (ver Fig. 3.2),

por lo que la longitud de fibra sensible se reducirá a una cuarta parte de la longitud total de fibra en el sensor. Considerando esto, será necesario utilizar cuatro veces más longitud de fibra de lo calculado anteriormente, esto es ~ 13 m de fibra óptica.

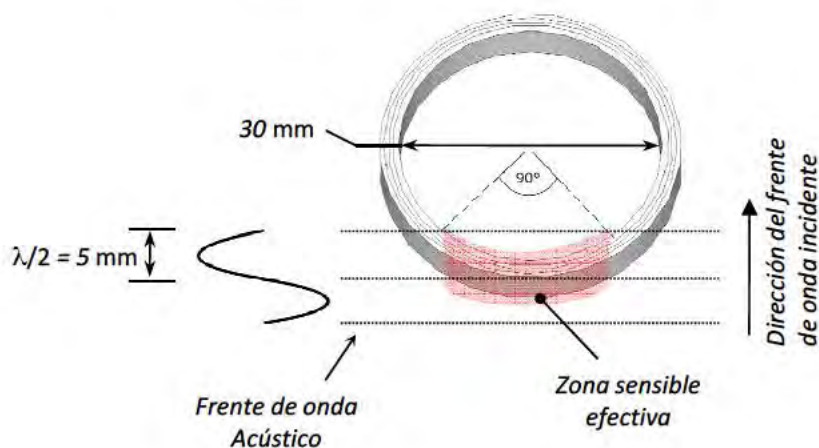


Figura 3.2. Estimación de la zona sensible efectiva del sensor a una frecuencia de 150 kHz.

La construcción del sensor se llevó a cabo de forma manual, enrollando la FO sobre un carrete de forma de cilíndrica con un diámetro de 30 mm, el cual fue removido posteriormente una vez terminado el proceso de embobinado. Para poder enrollar la cantidad de fibra necesaria para la construcción del sensor y mantener unas dimensiones adecuadas, fue necesario construir la bobina en un diseño con múltiples capas. En la Fig. 3.3 se observa el detalle de la construcción del sensor de FO en forma de bobina.

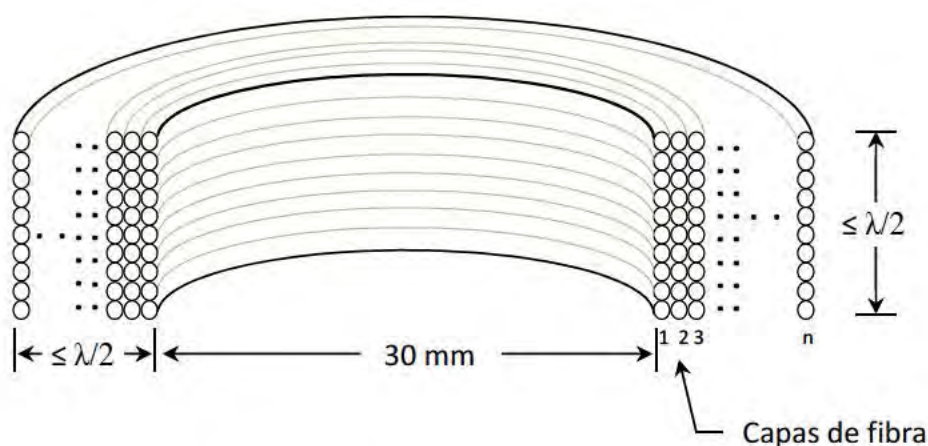


Figura 3.3. Construcción del sensor de FO. El diseño en forma de bobina con múltiples capas permite incorporar la longitud de fibra necesaria manteniendo las dimensiones adecuadas en el sensor.

Durante la construcción del sensor se tuvo especial cuidado en mantener las dimensiones de la sección transversal de la bobina de FO por debajo de $\lambda/2$ (5 mm), a fin de obtener un patrón direccional amplio; ya que, de otra forma, si se sobrepasan estas dimensiones, podría verse afectada la direccionalidad por causa del efecto de promediado del campo acústico sobre la sección transversal del sensor.

Por otra parte, una vez construido el sensor fue necesario diseñar un sistema que permita obtener la lectura de fase del sensor y poder así extraer la medida de la presión acústica. El diseño y desarrollo de este sistema se presenta más adelante, en el apartado 3.4.1.2.

3.4 Caracterización del sensor de fibra óptica

La caracterización del sensor de fibra óptica y de la cadena de medida fue realizada dentro de una plataforma experimental de ensayos acústicos en agua. Esta plataforma es capaz de generar emisiones acústicas de características similares a las producidas por las DP. Asimismo, fue necesario implementar un interferómetro y una cadena de medida completa incluyendo acondicionamiento de señal para poder obtener la lectura de fase del sensor de FO. La construcción de la plataforma de ensayos acústicos y del interferómetro junto con sus características más importantes y los resultados de la calibración del sensor se presentan a continuación.

3.4.1 Esquema experimental utilizado en los ensayos de caracterización del sensor

3.4.1.1 Plataforma experimental de generación de emisiones acústicas

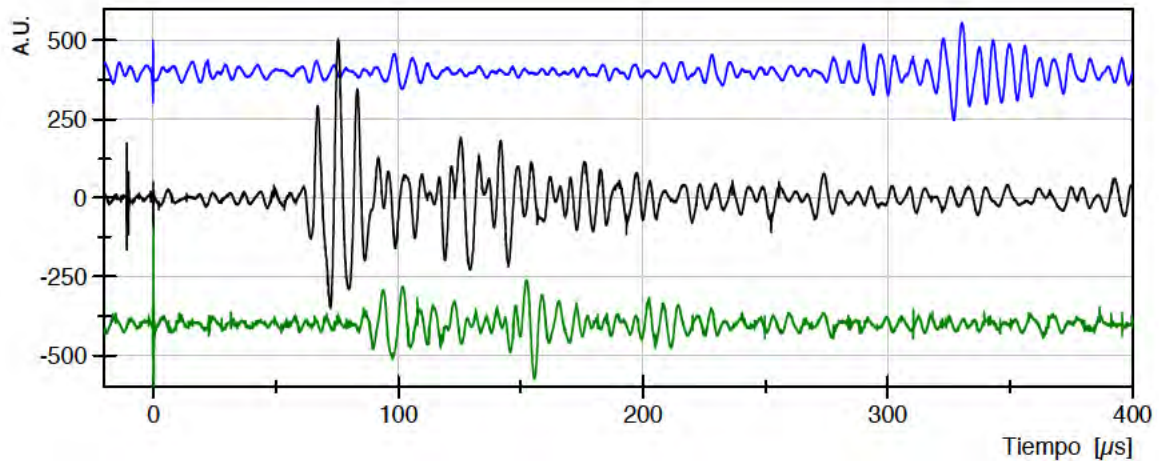
La dificultad que supone una caracterización del sistema de medida en un transformador, en donde se encuentran problemas como el ruido, el comportamiento estocástico de generación de las descargas parciales y las altas tensiones necesarias para generarlas, motiva la construcción de una plataforma acústica experimental de laboratorio que permita emular la emisión acústica del entorno real, pero sin la necesidad de someter

los equipos de medida a un entorno eléctrico hostil y, sobre todo, proporcionando un entorno de trabajo seguro para el personal de laboratorio.

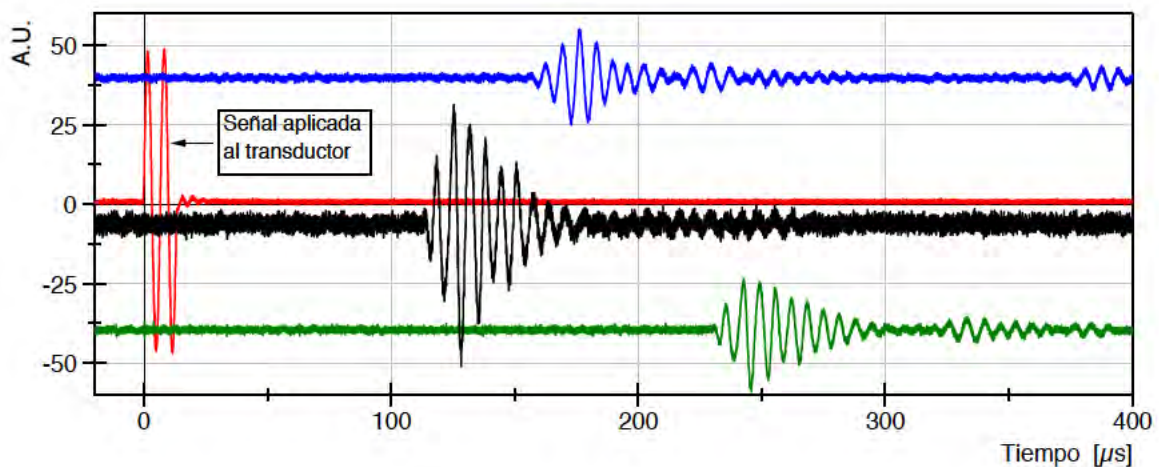
En otros trabajos de investigación enfocados en el desarrollo de sensores ópticos de diversas tecnologías para detección de DP en el interior de transformadores, la caracterización y pruebas de validación de los mismos, han sido llevadas a cabo en plataformas de generación de EA con los sensores sumergidos en agua [3.7]–[3.10]. Esto se debe a que las características de propagación y atenuación de las EA a las frecuencias de interés, en torno a 150 kHz, son similares en ambos medios, agua y en el aceite de transformador. Se conoce p.ej. que la velocidad de propagación de la EA en el aceite de transformador a 25 °C es 1390 m/s [3.11] mientras que en el agua es de 1495 m/s, lo que representa una diferencia <10%. Por otra parte, en cuanto a la atenuación de la EA en el medio de propagación, se conoce por los resultados de investigaciones previas realizadas por Harrold [3.12], y también por Meunier y Vaillancourt [3.13], que la atenuación de la EA producida por una DP en aceite de transformador presenta una relación inversamente proporcional con la distancia a la fuente de EA. Esta atenuación característica se atribuye a la geometría esférica del frente de onda de la EA [3.14]. En este sentido, se pudo comprobar experimentalmente mediante ensayos realizados en agua utilizando un transductor omnidireccional para generar EA (ver anexo A), que la atenuación de las EA en agua a las frecuencias de interés presentan el mismo comportamiento inversamente proporcional en relación con la distancia de la fuente de EA.

La plataforma de generación de EA está constituida principalmente por un recipiente de forma cubica lleno de agua. Sus dimensiones son 100 cm x 60 cm x 60 cm. Las paredes tienen un grosor de 1.5 cm y están construidas con polimetilmetacrilato (PMMA), un material que al ser transparente facilita la preparación y puesta a punto de un esquema experimental. El PMMA tiene también ventajas frente a otros materiales que también son transparentes como el vidrio, o frente a los metálicos que se utilizan en el tanque de un transformador real, debido a que proporciona mejor acoplo de la señal acústica hacia los sensores externos, en el caso en que se desee incluir este tipo de sensores en un ensayo. En la plataforma se incluyen además aislantes acústicos sobre las paredes del tanque con el fin de evitar la influencia de ecos de la señal acústica que puedan perturbar las mediciones. Los aislantes acústicos pueden ser también removidos si fuera necesario para algún ensayo en particular.

Las EA que se generan en esta plataforma experimental son de características similares a las que fueron registradas previamente en un banco de ensayos en el que se generan DP en aceite de transformador por medio de electrodos conectados a alta tensión [3.15]. El tipo de señales acústicas detectadas en este banco de generación de DP y las reproducidas en la plataforma en agua se pueden observar en detalle en la Fig. 3.4a y 3.4b respectivamente.



(a)



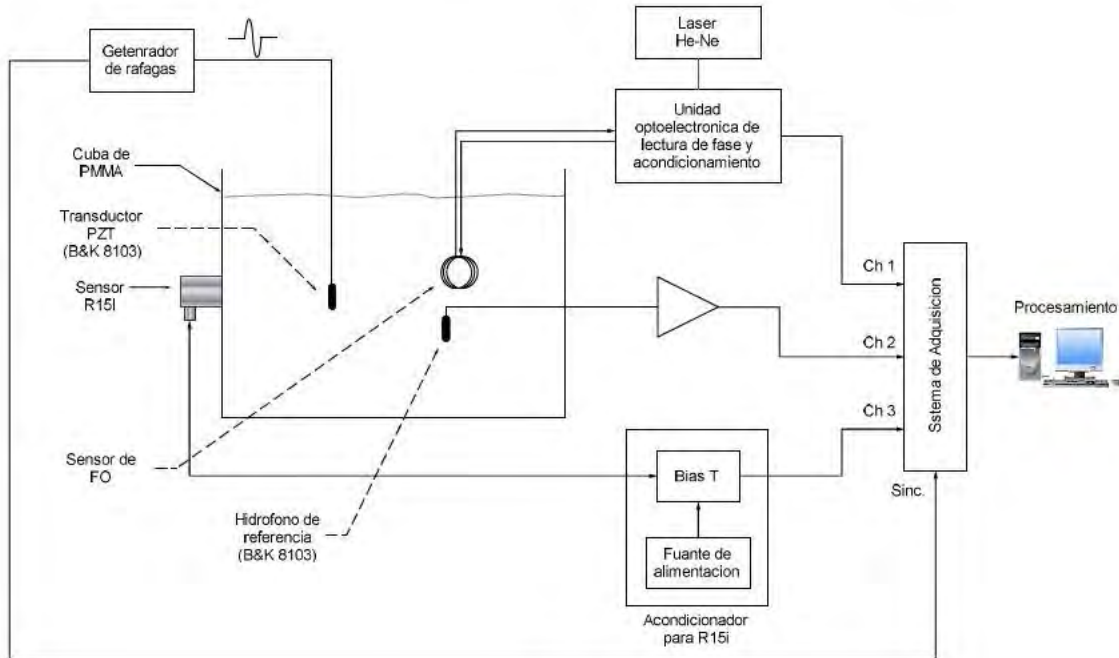
(b)

Figura 3.4. (a) Señales acústicas registradas en un banco de generación de DP en aceite con electrodos sometidos a alta tensión. (b) señales acústicas reproducidas en la plataforma experimental de ensayos acústicos en agua. (En ambos casos las señales fueron detectadas con sensores externos modelo R15i).

Para generar este tipo de señales en la plataforma de ensayos acústicos en agua se utiliza un generador de ráfagas sinusoidales ajustables tanto en frecuencia como en el periodo activo del pulso. Estas señales son aplicadas a un transductor ultrasónico PZT

CAPÍTULO 3: Diseño de un sensor intrínseco de fibra óptica para la detección acústica de descargas parciales

sumergible (B&K modelo: 8103) que funciona como emisor. En la Fig. 3.4b se puede observar el tipo de señal que se le aplica al transductor utilizado como fuente de emisión y su correspondiente EA detectada con sensores PZT externos modelo R15i.



(a)



(b)

Figura 3.5. (a) Esquema de la configuración experimental utilizada para la caracterización de los sensores en la plataforma de ensayos acústicos en agua. (b) Detalle fotográfico de la plataforma de ensayos acústicos en agua.

La configuración experimental utilizada para la caracterización del sensor de FO junto con de la plataforma de ensayos acústicos se pueden observar con detalle en las Fig. 3.5a y 3.5b respectivamente. En la configuración experimental incluye un hidrófono de referencia ubicado cerca del sensor de FO con el fin de obtener una medida de la presión acústica que llega al sensor de FO en todo momento. El hidrófono empleado para este fin es idéntico al transductor que se utiliza como fuente de emisión.

3.4.1.2 Interferómetro de fibra óptica con detección homodina activa

Para poder obtener una lectura de la fase óptica del sensor de fibra, fue necesario implementar un sistema de instrumentación optoelectrónico que permita acondicionar adecuadamente la señal de fase. Por esta razón se diseñó el esquema mostrado en la Fig. 3.6.

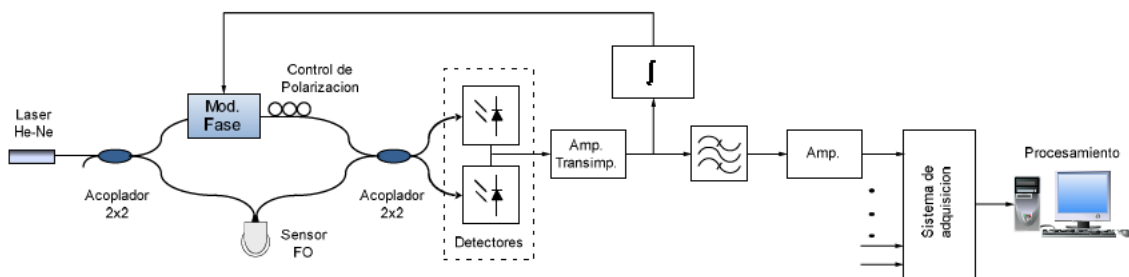


Figura 3.6. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación optoelectrónico desarrollado para la lectura de fase del sensor de fibra óptica.

En el esquema planteado la fase del sensor de fibra se obtiene mediante un interferómetro de tipo Mach-Zehnder construido completamente de fibra óptica. La cadena de medida consta básicamente de una fuente de luz coherente (Láser de He-Ne, longitud de onda de 633 nm), una sonda de FO para la detección de ultrasonidos, la cual se ubicará en el interior de la plataforma de ensayos acústicos o en la zona de monitorización, un interferómetro de FO, un sistema electro-mecánico de estabilización para compensar las perturbaciones de baja frecuencia, un amplificador de transimpedancia con dos fotodetectores en configuración diferencial, una etapa de filtrado paso-banda y, por último, una segunda etapa de amplificación para la adaptación de niveles de señal.

En el esquema se emplea una fuente de luz coherente para iluminar el sistema, en este caso es un láser de He-Ne. Por medio de un acoplador 2x2 con una relación 50:50, se

divide la potencia óptica del haz de entrada en dos y se lleva hasta los brazos del interferómetro. Uno de ellos es el brazo de medida y es donde está ubicado el sensor de FO; el otro, es un brazo de referencia. La diferencia del camino óptico recorrido por el haz láser entre uno y otro brazo se manifiesta como una diferencia de fase óptica que, una vez combinada la luz de los brazos por medio de otro acoplador 2x2, se puede detectar como intensidad óptica con la ayuda de fotodetectores. Cuando la señal óptica a la salida del interferómetro se detecta mediante los fotodetectores, se obtiene la señal de fotocorriente descrita en anteriormente en la ec. 2.6. Esta se convierte posteriormente en una señal de tensión equivalente mediante un amplificador de transimpedancia. En el esquema de la Fig. 3.6 se puede observar además que se realiza una estabilización homodina activa en el interferómetro a través de un lazo de realimentación que actúa sobre la fase óptica en el brazo de referencia. Como se mencionó anteriormente en el capítulo 2, esta permite compensar las perturbaciones de baja frecuencia y mantener el interferómetro en cuadratura con el fin de estabilizar el punto de operación del en la zona cuasi lineal (entre $-\pi/4$ rad y $\pi/4$ rad). Una vez el sistema está estabilizado y se ha eliminado la componente DC, la señal de salida en tensión (V_o) se observa directamente proporcional a la fase óptica, tal y como se muestra en la ec. 3.8:

$$V_o = V_m \cdot \eta \cdot \Delta\phi \quad (3.5)$$

donde V_m es la tensión máxima de salida y η es la visibilidad; la cual, como se mencionó en el capítulo 2, es un parámetro que determina el contraste de la señal de interferencia óptica. El esquema optoelectrónico también incluye un control de polarización con el fin de evitar el desvanecimiento de la señal de interferencia producido por cambios de polarización. Antes de tomar una serie de medidas se debe ajustar este controlador de polarización para obtener un margen de amplitud adecuado en la señal de salida.

Por otra parte, la etapa de filtrado paso-banda incluida en la cadena de medida limita el ancho de banda de detección a las frecuencias de interés, que para el caso de las DP se encuentra comprendido entre 100kHz y 300 kHz; tal y como lo recomienda el estándar IEEE-Std-C57.127™-2007 para la detección acústica de DP [3.3]. En el anexo B se presenta una caracterización de la respuesta en frecuencia de la etapa de filtrado paso-banda.

3.4.2 Detección de emisiones acústicas y sensibilidad a 150 kHz

3.4.2.1 Detección de emisiones acústicas

La primera de las pruebas realizada con el sensor de FO fue la de observar su respuesta ante la detección de una EA. Para ello se utilizó la plataforma de ensayos acústicos descrita en la sección 3.4.1 a fin de generar EA con una frecuencia de 150 kHz y detectarlas con el sensor de FO sumergido en agua.

Durante los ensayos se encontró que el sensor de FO presenta una respuesta doble característica que se hace muy evidente ante la detección de EA de corta duración. Este tipo de respuesta se atribuye a la geometría del sensor, ya que al tener una forma de anillo el sensor tiene dos caras igualmente sensibles. Para comprobarlo, se realizaron medidas utilizando una EA de corta duración, más corta que el tiempo que tarda la EA en viajar una distancia igual al diámetro del sensor (30 mm), de tal forma que se pueda observar de forma clara la detección sobre ambas caras sensibles. En la Fig. 3.7 se muestra el tipo de señales detectadas durante el ensayo, en el que se incluyó además un hidrófono de referencia para detectar simultáneamente la señal de EA.

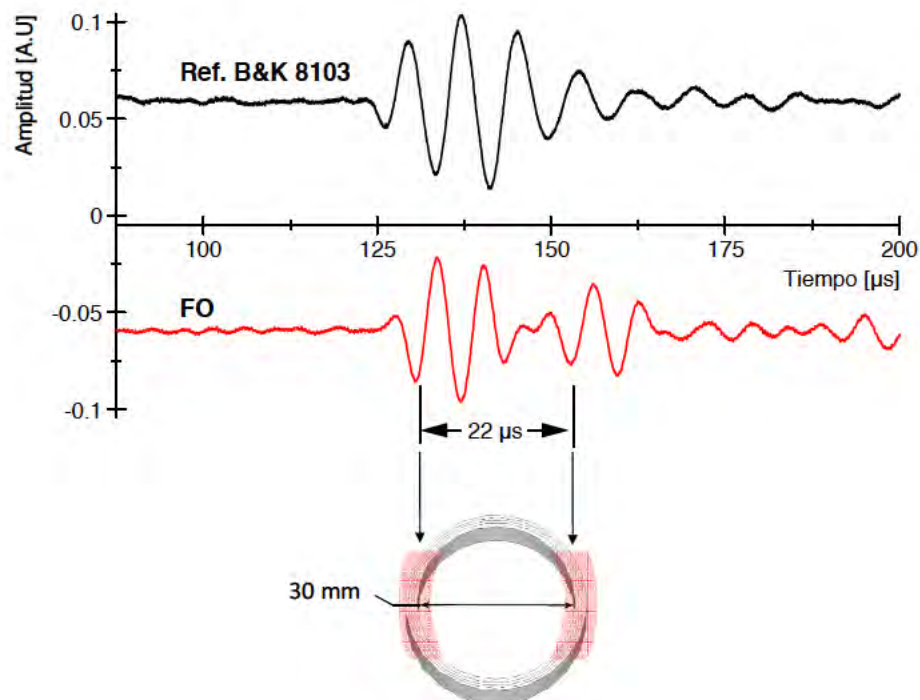


Figura 3.7. Respuesta doble observada en el sensor de FO.

Como se puede observar en la Fig. 3.7, el tiempo transcurrido entre los dos transitorios que presenta la señal detectada es de $22 \mu\text{s}$, lo cual corresponde con el tiempo que tarda la EA en recorrer la distancia entre las dos caras sensibles; es decir, los 30 mm de diámetro del sensor viajando a la velocidad del sonido en el agua, que es de 1493 m/s ($1.49 \text{ mm}/\mu\text{s}$) a 25°C . Con en estos resultados se comprueba que la característica de la respuesta doble se debe a las dos caras sensibles del sensor.

Este tipo de respuesta puede resultar desfavorable de cara a la aplicación final debido a que las PD son de corta duración [3.3], [3.16] y por tanto es probable que ante la detección su EA, se observe una respuesta doble similar a la señal mostrada en la figura anterior. Esto puede conllevar a resultados ambiguos en la detección y sobre todo en la localización de las fuentes de DP, en donde normalmente se utiliza la detección por umbral para medir los tiempos de llegada de las EA. Por este motivo, se propone una solución simple que consiste en encapsular el sensor de forma que solo una de las caras sensibles quede expuesta al entorno de medida, de esta forma se eliminaría o al menos se reduciría la sensibilidad de la segunda cara del sensor y, por tanto, también la característica de respuesta doble. En la Fig. 3.8a y 3.8b se muestra el sensor de FO antes y después de la implementación del encapsulado.

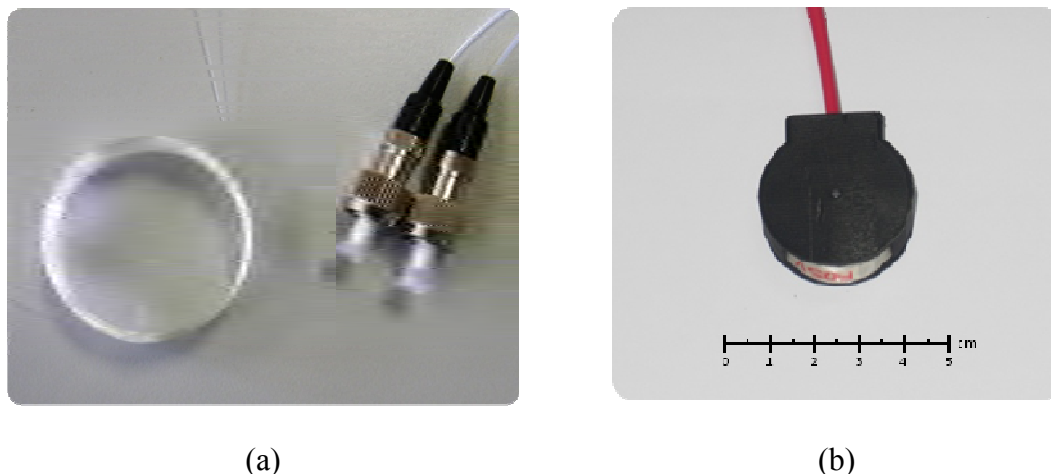


Figura 3.8. Sensor de FO (a) sin encapsulado, (b) con encapsulado.

Una vez construido el encapsulado del sensor se tomaron medidas nuevamente con el fin de observar respuesta del sensor ante una EA de corta duración y comprobar si se logra eliminar la característica de doble respuesta. En la Fig. 3.9 se muestran los resultados de las nuevas medidas tomadas con el sensor encapsulado.

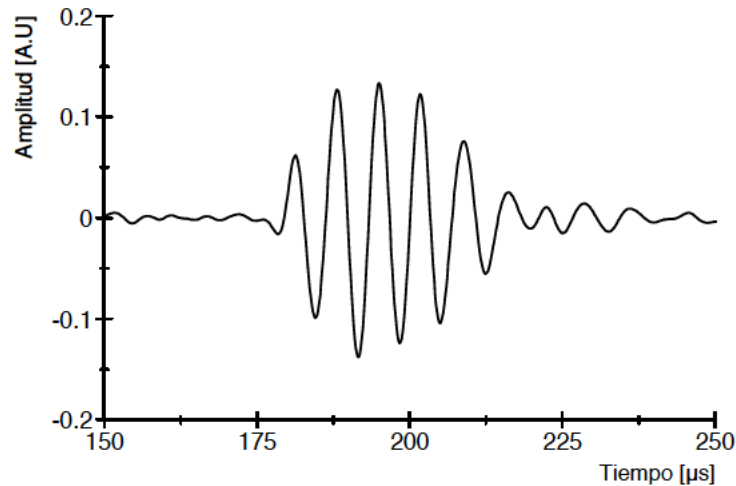


Figura 3.9. Respuesta típica del sensor de FO encapsulado ante una EA de corta duración.

Como se puede observar en el gráfico de la Fig. 3.9, utilizando el encapsulado la respuesta doble es inapreciable. El encapsulado del sensor está construido, por el momento, de plástico (PVC) debido a que con este material se pueden elaborar piezas fácilmente utilizando p. ej. una impresora 3-D. No obstante, no es el material adecuado para la aplicación final ya que no soportaría la temperatura ni las condiciones dentro de un transformador y, además, su interacción con el aceite de transformador podría degradar el sistema de aislamiento del transformador. En este sentido, un material adecuado y que además ha sido probado en el entorno de la aplicación es el Teflon[®] (PTFE). Con este material se han construido recubrimientos para sensores de FO desarrollados para la medición de temperatura en el interior de transformadores [3.17]–[3.21]. En un futuro, se propone la construcción del mismo encapsulado pero en PTFE con el fin de adecuar el sensor para su instalación en un transformador.

3.4.2.2 Sensibilidad a 150 kHz

Según los cálculos realizados en la sección 3.3, se espera obtener la sensibilidad deseada (10 mV/Pa) con una longitud de fibra de ~13m. En este ensayo se realizaron medidas de la sensibilidad de varios sensores de FO con diferentes longitudes de fibra; los cuales, que fueron construidos en forma de bobina con múltiples capas con el fin de mantener un diseño compacto y poder ajustar la sensibilidad incrementando la longitud de fibra añadiendo capas al sensor. Las medidas fueron realizadas a la frecuencia de

resonancia del sensor externo R15i, que es de 150 kHz, ya que se desea obtener una sensibilidad similar a la de este sensor a esa misma frecuencia.

Durante las medidas se emitieron ráfagas sinusoidales de 150 kHz, las cuales se fueron detectadas simultáneamente con el sensor de FO y con el hidrófono de referencia. Un ejemplo del tipo de señales detectadas durante el ensayo es el que se observa en la Fig. 3.10. Los resultados obtenidos en esta prueba se presentan resumidos en la tabla 3.1.

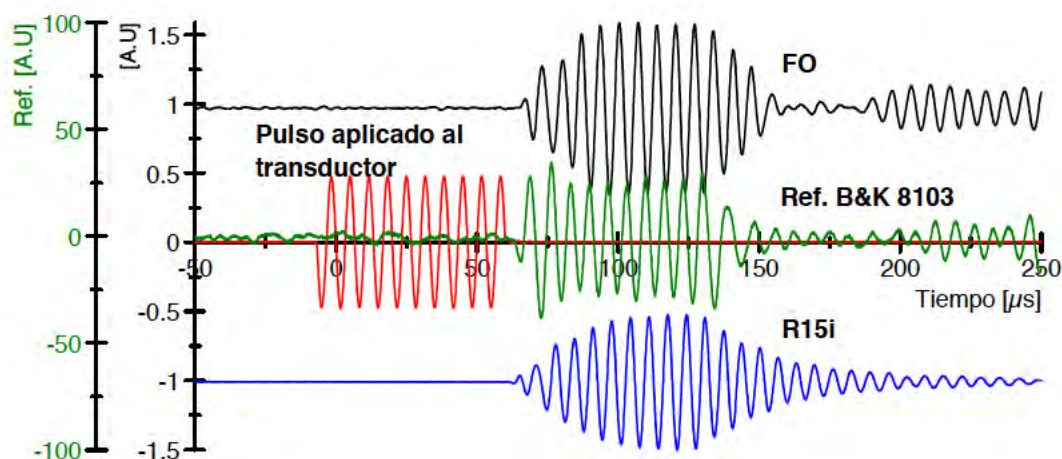


Figura 3.10. EA de 150 kHz detectada durante la calibración de sensibilidad.

No. de capas del sensor	Longitud de fibra (m)	Sensibilidad (@ 150kHz)	
		(mV/Pa)*	(m rad/Pa)
1	3,4	2,9	0,29
2	6,8	4,6	0,46
5	17	11,1	1,1

*Dentro de un sistema interferométrico con detección estabilización homodina activa, con un rango de salida de 20V_{pp} y una longitud de onda de 633nm.

Tabla 3.1. Sensibilidad del sensor de FO a 150 kHz

En los resultados se encontró una relación proporcional entre la sensibilidad y el número de capas del sensor. Se obtuvo además una sensibilidad comparable con la de un sensor R15i utilizando un sensor de FO construido con 17 m de fibra óptica dispuestos en una bobina de 5 capas.

3.4.3 Respuesta en frecuencia

En esta caracterización se realizó un barrido en frecuencia entre 50 kHz y 200 kHz, que es el rango para el cual el hidrófono de referencia se encuentra calibrado. Se incluye además en la configuración experimental un sensor externo R15i con el fin de realizar un análisis comparativo. Los resultados de estas medidas se recogen en la Fig. 3.11.

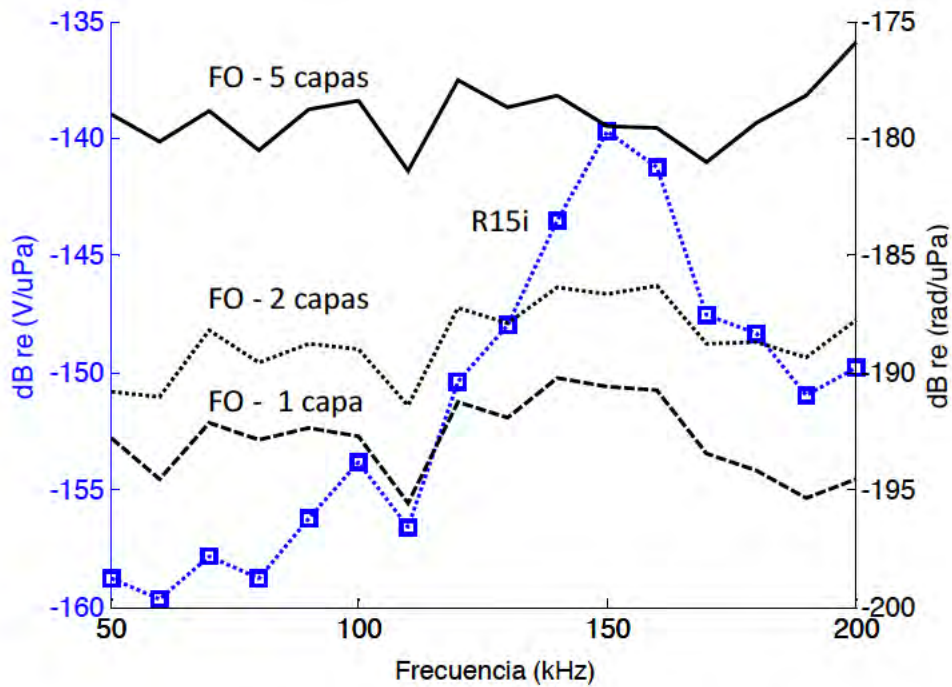


Figura 3.11. Respuesta en frecuencia del sensor de FO.

En esta caracterización se pudo observar que, en conjunto, el sistema de medida con sensor de fibra óptica tiene un ancho de banda más amplio en comparación con un sensor R15i. Además, presenta una respuesta casi plana entre 100 kHz y 200 kHz, lo que podría ser útil para identificar descargas parciales ya que parte de la energía acústica emitida por estas se encuentra también en esa parte del espectro. Sin embargo, existe la desventaja del ruido resultante como consecuencia del ancho de banda más amplio del sistema de medida con el sensor de FO.

3.4.4 Direccionalidad

Se conoce de antemano que los sensores externos, como el R15i, tienen un campo de visión estrecho; sin embargo, esta característica no representa un problema para los sensores externos ya que ante la detección de una EA débil, estos se pueden recolocar fácilmente en otra posición a fin de explorar la zona circundante hasta encontrar una señal acústica con suficiente amplitud. Este no es el caso para un sensor interno ya que una vez que este se ha instalado no existe la posibilidad de recolocación, por lo que se requiere de una característica direccional más amplia en el sensor de FO con el fin de poder inspeccionar una zona de tamaño considerable como lo puede ser el devanado de un transformador. A continuación, en la Fig. 3.12, se muestran los resultados de la direccionalidad del sensor de FO sin el encapsulado, frente a la de un sensor externo modelo R15i. Para ambos sensores las medidas de la direccionalidad fueron tomadas a una frecuencia de 150 kHz.

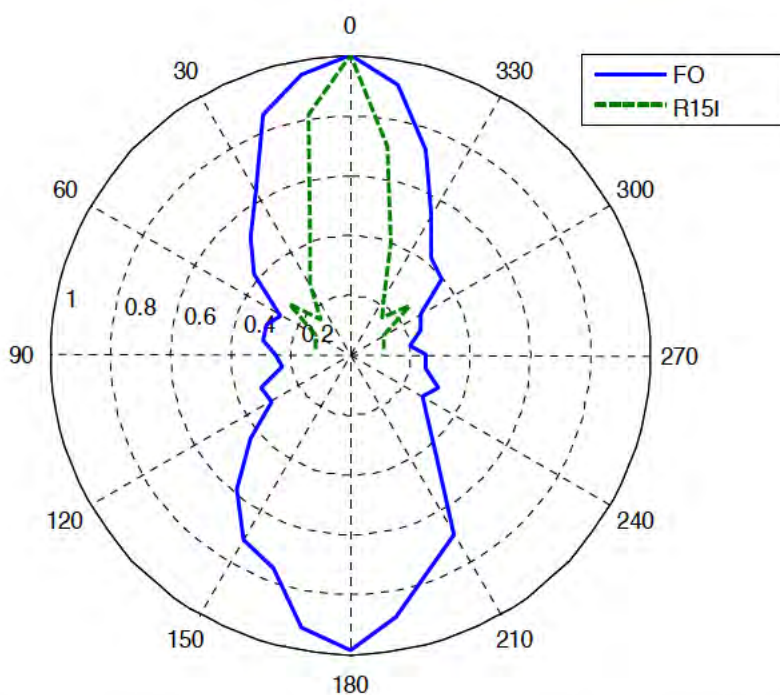


Figura 3.12. Direccionalidad del sensor interferométrico de FO sin encapsulado y del sensor externo R15i a una frecuencia de 150 kHz.

En los resultados se encontró que el sensor interferométrico de FO tiene un campo de detección más amplio, con un *span* direccional de aproximadamente $\pm 30^\circ$, frente al de un sensor externo R15i, que es de $\pm 15^\circ$. También se puede observar en el gráfico que las dos

caras sensibles del sensor ubicadas a 180° una de la otra, tienen la misma sensibilidad, lo que comprueba una vez más el motivo de la respuesta doble característica de este sensor sin encapsulado.

Por otra parte, una vez que fue diseñado y construido el encapsulado del sensor de FO, se realizaron medidas nuevamente para comprobar que las características direccionales del sensor de FO se mantienen. Los resultados de estas nuevas medidas se muestran en la Fig. 3.13.

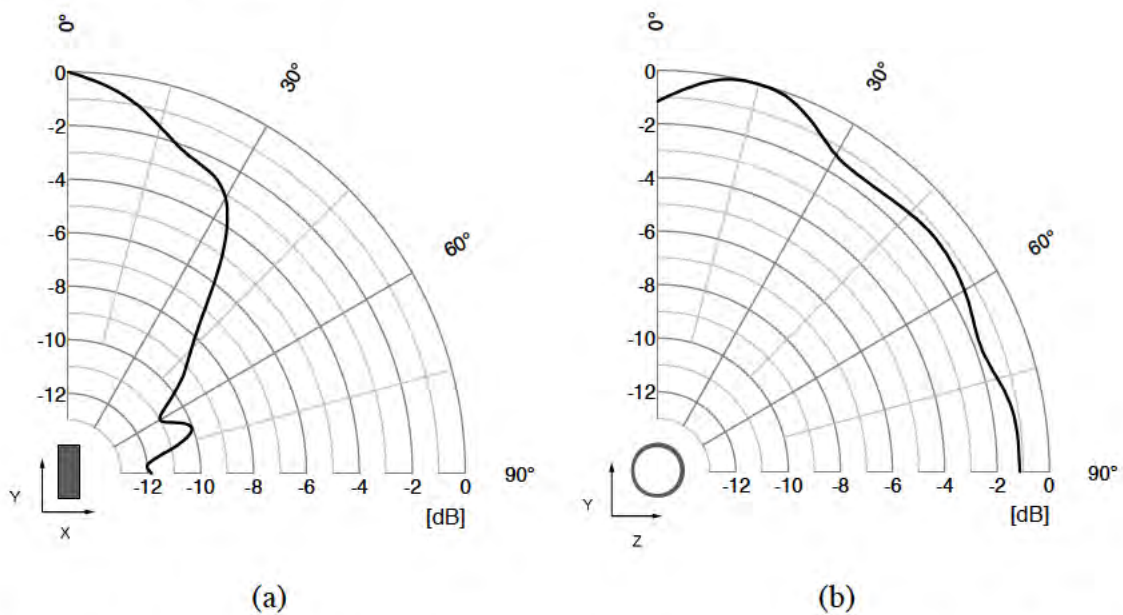


Figura 3.13. Direccionalidad del sensor interno de FO con el encapsulado. (a) direccionalidad en el plano x-y, (b) direccionalidad en el plano z-y.

Como se puede observar en el gráfico de la Fig. 3.13a, el sensor de FO encapsulado conserva el *span* direccional de $\pm 30^\circ$ en el plano x-y. Además, en el gráfico de la Fig. 3.13b, se puede comprobar que el sensor presenta un ángulo de detección de $\pm 180^\circ$ en el plano z-y. Esta característica se podría aprovechar de cara a la medida en un transformador, colocando el sensor con una orientación en un sentido u otro (x-y o z-y) según zona del transformador que se desee inspeccionar. Por ejemplo, si se desea inspeccionar el devanado de un transformador que, normalmente, tienen unas dimensiones en altura mayores que en su diámetro, conviene colocar el sensor con su plano z-y paralelo al eje del devanado del transformador. De esta forma, en principio, se podría inspeccionar uno de los devanados de un transformador utilizando dos sensores de FO, tal y como se puede observar en el gráfico de la Fig. 3.14.

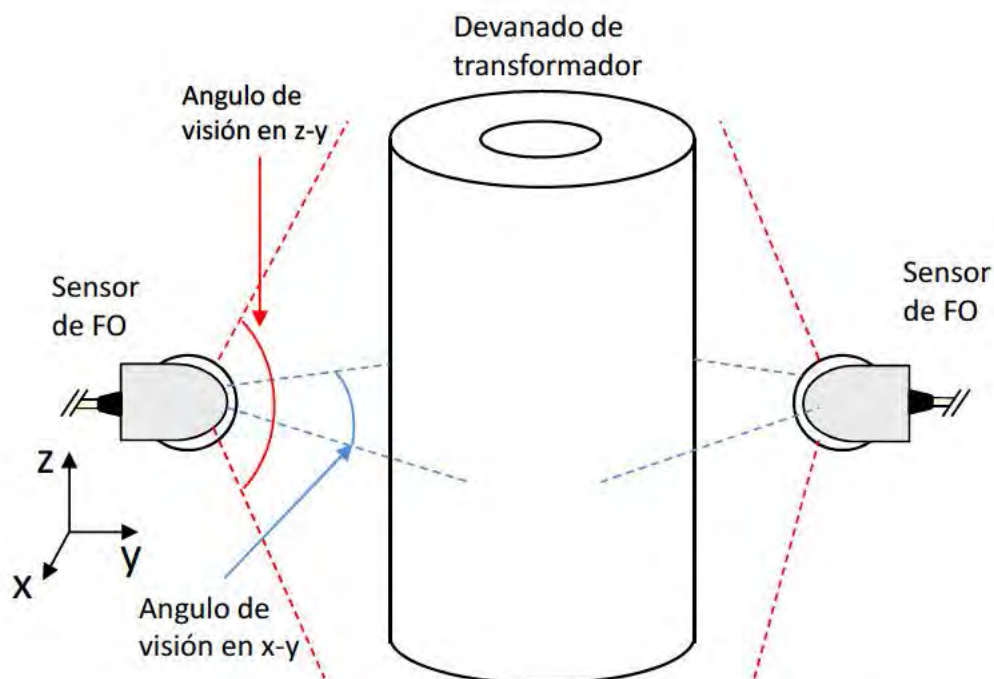


Figura 3.14. Ejemplo de la colocación de un sensor de FO para la inspección de un devanado de transformador aprovechando el amplio ángulo de visión en el plano z-y para cubrir toda la altura del devanado.

Finalmente, en la tabla 3.2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la caracterización del sensor de FO.

Parámetro	Valor	Unidades
Sensibilidad (a 150 kHz)	1,1 (11)*	mrad/Pa (mV/Pa)*
Resolución	1*	Pa
Direccionalidad (a 150 kHz)	Plano x-y	±30 °
	Plano z-y	±180 °
Rango de frecuencia de operación	50 – 200	kHz

*Dentro de un sistema interferométrico con detección estabilización homodina activa, con un rango de salida de 20 V_{pp} y una longitud de onda de 633nm.

Tabla 3.2. Características del sensor de FO

Capítulo 4

Sistema de instrumentación multicanal para la detección de ultrasonidos con sensores de fibra óptica

4.1 Introducción

Como se mostró en el capítulo anterior, para poder obtener la medida con el sensor intrínseco de fibra óptica que se ha diseñado, la cual se encuentra codificada en la fase de la señal óptica que recorre el sensor, es necesario realizar una lectura interferométrica del mismo. Durante la caracterización del sensor se utilizó un interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica en que se realizó una estabilización homodina (o detección homodina activa) con el fin de linealizar la salida del sistema. Este tipo de demodulación resulta muy práctica en esquemas en donde se utiliza un solo sensor; sin embargo, para el caso de varios sensores sería necesario estabilizar el brazo de referencia de cada canal de forma independientemente si se desea realizar una medida simultánea, por lo que se necesitaría de tantos lazos de realimentación como sensores en el interferómetro. Este

hecho sumado a toda la labor que requiere la sintonización de cada lazo, hacen de esta aproximación una opción poco práctica en un esquema con múltiples canales. Por tal motivo, como parte de esta tesis, se propone y desarrolla un esquema para la lectura de múltiples sensores intrínsecos de fibra óptica en el cual se utiliza un interferómetro heterodino de fibra óptica y técnicas de demodulación digital para la obtención de la lectura de fase del sensor.

4.2 Interferometría láser heterodina

A diferencia de la interferometría laser homodina en la que interfieren dos ondas de la misma frecuencia, en la interferometría heterodina se utilizan dos ondas con una ligera diferencia de frecuencia, las cuales se superponen en el área activa de un fotodetector. La señal de fotocorriente (I) que se produce al detectar la interferencia es proporcional al cuadrado de la suma de los campos eléctricos. Esta se observa de la siguiente forma [4.1]:

$$\begin{aligned} I &= R [A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi)]^2 \\ &= R [1/2 (A_1^2 + A_2^2) + A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi)] \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde A_1 y A_2 son las amplitudes los campos eléctricos correspondientes a las dos señales ópticas que interfieren y ω_1 y ω_2 son sus respectivas frecuencias. R es la responsividad del fotodetector y ϕ es la diferencia de fase entre las dos señales ópticas. Como se puede observar en la ec. (4.1), la señal de fotocorriente es una portadora con una frecuencia igual a la diferencia de las dos frecuencias ópticas ($\omega_1 - \omega_2$). Esta se conoce como frecuencia de batido. En la Fig. 4.1 se puede observar en detalle el efecto de batido causado por la superposición de las dos señales ópticas en el fotodetector.

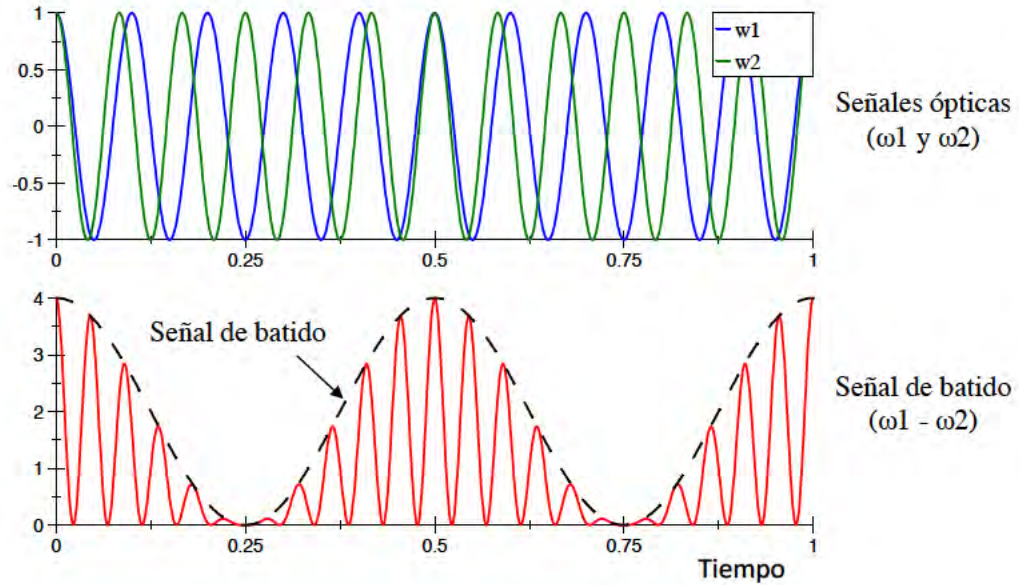


Figura 4.1. Fenómeno de batido causado por la superposición de dos ondas monocromáticas con una diferencia de frecuencia.

Se puede observar en la figura anterior que la señal de batido es la envolvente de la señal que resulta de la superposición de las dos ondas con frecuencias ω_1 y ω_2 . Esta señal heterodina es una réplica exacta de la señal original (señal óptica), pero en un rango de frecuencias mucho más bajo ($\sim 10^6$ Hz), por lo que puede ser tratada electrónicamente para su acondicionamiento. Además, conserva la información de la fase en la que se encuentra codificada la medida interferométrica.

La generación de las dos señales con frecuencias ópticas ω_1 y ω_2 en los esquemas de interferómetros láser heterodinicos normalmente se realiza con un dispositivo láser de dos longitudes de onda (*dual-mode*) [4.2]–[4.4], o también por medio de un modulador acusto-óptico (AOM) [4.5]. Este último es un dispositivo que emplea el efecto acusto-óptico para realizar un pequeño desplazamiento de la frecuencia óptica de un haz láser [4.6]. Este desplazamiento es de decenas a cientos de megahercios. En los esquemas heterodinicos con AOM, este dispositivo se encuentra en uno de los brazos del interferómetro a fin de realizar el desplazamiento de la frecuencia del haz correspondiente a ese brazo. En la Fig. 4.2 se muestran ejemplos de esquemas básicos de interferómetros heterodinicos en los que se emplean ambos dispositivos, láser de dos modos y AOM.

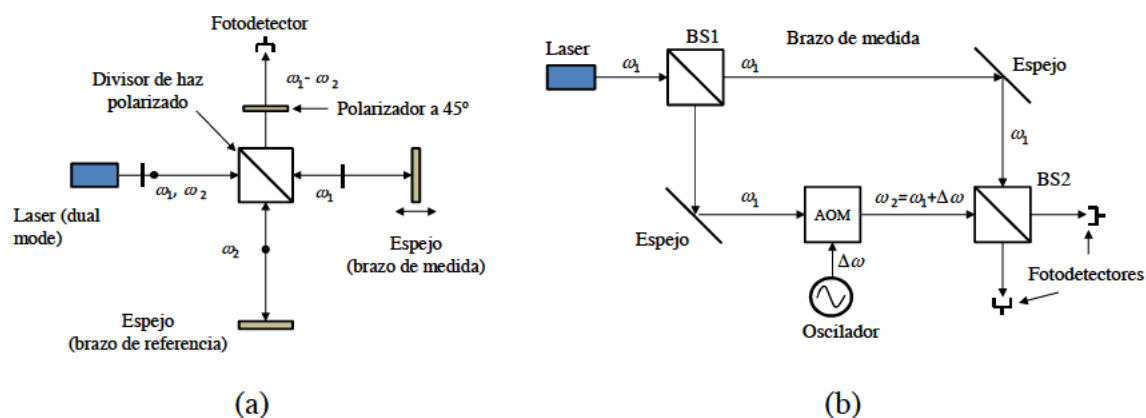


Figura 4.2. Esquemas simplificados de interferómetros heterodinos en configuración (a) Michelson y (b) Mach-Zehnder.

En el interferómetro de Michelson de la Fig. 4.2a, se utiliza un láser que emite las dos frecuencias ópticas ω_1 y ω_2 polarizadas linealmente pero con un ángulo a 90° una respecto de la otra. El divisor de haz polarizado separa las dos señales ópticas con diferente polarización y envía una de ellas hacia el brazo de referencia y la otra hacia el brazo de medida. Luego de ser reflejadas por los espejos ubicados en cada brazo, éstas se regresan hacia el divisor de haz y se envían en dirección al fotodiodo donde se mezclan las señales mediante un polarizador orientado a 45° y se obtiene la señal de interferencia en el fotodiodo.

Por otra parte, en el esquema de Mach-Zehnder de la Fig. 4.2b, se utiliza un AOM colocado en el brazo de referencia del interferómetro con el fin de desplazar la frecuencia óptica del haz que atraviesa ese brazo. El haz del brazo de medida (frecuencia ω_1) y el del brazo de referencia con su frecuencia desplazada ($\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$) se combinan en BS2 para formar la señal de interferencia que será detectada posteriormente en el fotodetector.

Una de las ventajas que presentan los interferómetros heterodinos frente a los homodinos es precisamente la señal portadora ya que la fase, y por tanto la información de la medida, al estar modulando una señal AC resulta menos sensible a las fluctuaciones de potencia del láser, la luz ambiente y otras fuentes de ruido que afectan a la medida. Sin embargo, la fotodetección de la señal portadora requiere más ancho de banda y una electrónica acondicionada a frecuencias mayores.

4.3 Diseño del interferómetro heterodino multicanal

El sistema de instrumentación propuesto se compone fundamentalmente de un interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica que posee un brazo común de referencia y múltiples brazos de medida conformados por los sensores de fibra óptica. En la Fig. 4.3 se muestra el esquema del sistema de instrumentación propuesto.

En cada uno de los canales del nuevo sistema de instrumentación se desea obtener características similares a las conseguidas con el esquema de un solo canal mostrado en el capítulo 3, las cuales se encuentran resumidas en la tabla 3.2. Anteriormente en el sistema homodino de un solo canal, se utilizó un como fuente de luz un láser de He-Ne debido a que las prestaciones del sistema dependen en gran medida de la fuente de luz y este tipo de láseres en general cuenta con características que son favorables un sistema interferométrico como el aquí propuesto, como son: gran longitud de coherencia, estabilidad, bajo ruido de fase y de amplitud, entre otras. Además, como se puede deducir de la ec. 2.5, su longitud de onda corta permite obtener mayor sensibilidad de fase en el sistema interferométrico. El único inconveniente de un láser de este tipo es la limitación en la potencia óptica de salida. Para el caso del esquema de un canal, con un láser de He-Ne de 1 mW fue suficiente aunque las pérdidas por el acoplamiento a fibra llevaran la potencia óptica dentro del sistema a $\sim 0,3$ mW. Sin embargo, en un sistema con varios canales se necesitará mayor potencia óptica. Basado en la experiencia con el esquema de un canal, una estimación razonable de la potencia óptica necesaria en el nuevo sistema multicanal sería p. ej. 0,3 mW/canal, por lo que se necesitaría de al menos 1,2 mW de potencia óptica acoplados al sistema de fibra para el caso de 4 canales, que es la cantidad mínima de sensores que se necesitan para la localización de una fuente de EA.

Aunque existen láseres de He-Ne con mayor potencia óptica como p. ej. 5 – 10 mW, estos no serían los más adecuados para el sistema multicanal ya que son muy voluminosos y, por lo general, para esos valores de potencia óptica no entregan a la salida un solo modo longitudinal, lo que terminaría afectando drásticamente a las prestaciones del instrumento. En este sentido, una alternativa viable sería utilizar un láser de estado sólido como los de Nd:YAG o los de Nd:YVO₄. Estos dispositivos se encuentran disponibles en tamaños reducidos, lo cual es deseable para un diseño compacto, y pueden

entregar una potencia óptica mayor, en orden de al menos decenas de milivatios, manteniendo aún las características adecuadas [4.7]. Además, se ha demostrado que estos dispositivos poseen características idóneas para el funcionamiento en sistemas de instrumentación interferométricos de altas prestaciones [4.8]–[4.10]. Con base en este hecho se decide utilizar como fuente de luz un láser de estado sólido.

Los dispositivos láser disponibles dentro del mercado de láseres para instrumentación normalmente son de un coste relativamente elevado, en el orden de los miles de dólares; sin embargo, se desea utilizar un dispositivo láser de Nd:YVO₄ que fue adquirido por ~20 USD. Como puede esperarse con un dispositivo de tan bajo coste, el haz de salida no está acoplado a fibra y muchas de sus características no son proporcionadas por el vendedor, solo se conoce que es una fuente láser de estado sólido de Nd:YVO₄ con una potencia óptica de 10 mW y que su longitud de onda aproximada es de 532 nm. Por tal razón fue necesario realizar una caracterización de este dispositivo. Esta se presenta más adelante en el apartado 4.4.1.

En el esquema de la Fig. 4.3 se utiliza el dispositivo láser de estado sólido mencionado anteriormente para iluminar el sistema (Fig. 4.3a). El haz de salida de esta fuente de luz está colimado y es orientado hacia la entrada de un modulador acusto-óptico (AOM), el cual se realiza un desplazamiento la frecuencia del haz de entrada (Fig. 4.3b). Se emplea un oscilador para excitar el AOM a una frecuencia de 80 MHz y, como resultado, se obtiene a la salida del AOM un haz con su frecuencia óptica desplazada 80 MHz (1^{er} orden = $f_0 + 80$ MHz) y otro haz con la misma frecuencia óptica de entrada (orden 0 = f_0). Ambos se acoplan al sistema de fibra óptica por medio lentes (Fig. 4.3c) para ser llevados hacia los brazos del interferómetro (Fig. 4.3e) pasando por una etapa previa de división de haz (Fig. 4.3d) que se encarga distribuir la potencia óptica en partes iguales a cada uno de los sensores de FO.

4.3 Diseño del interferómetro heterodino multicanal

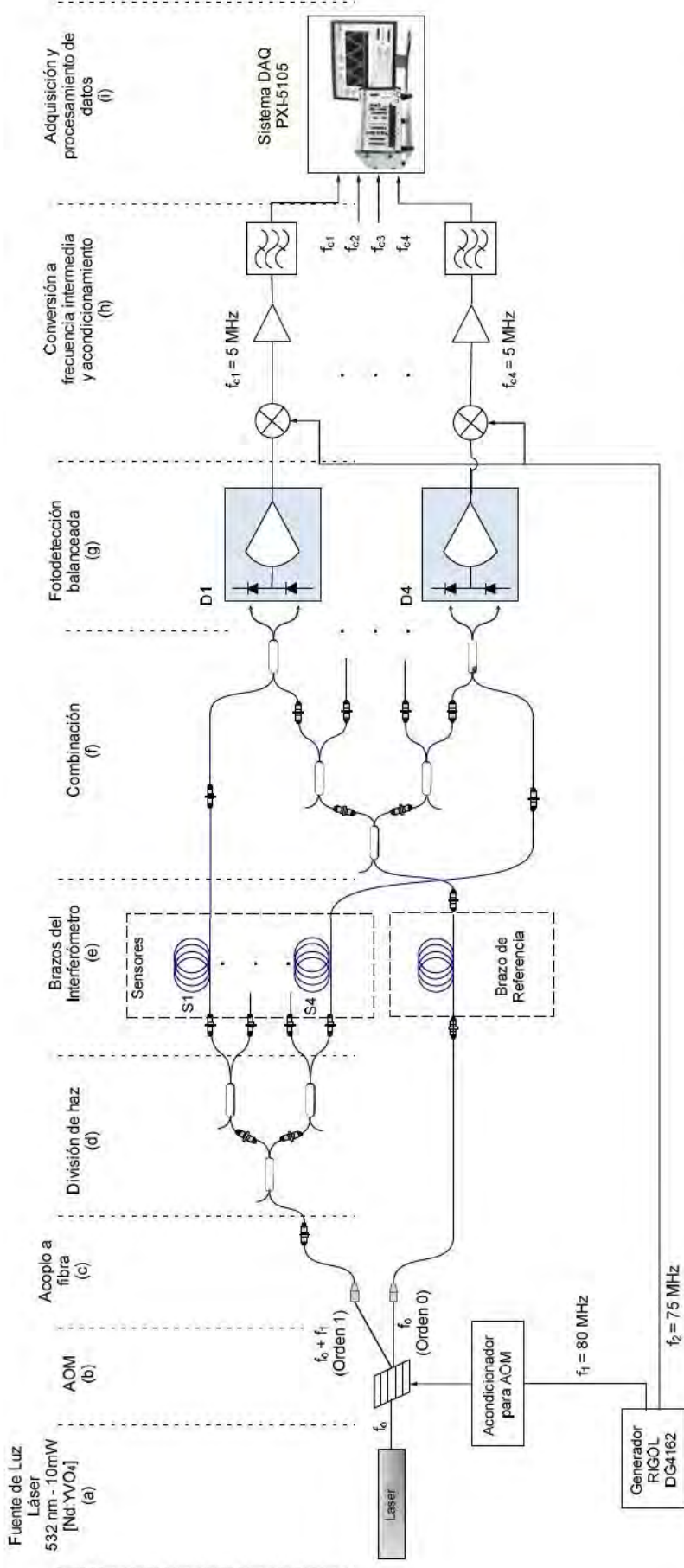


Figura 4.3. Esquema del sistema interferométrico multicanal. (a) Fuente de luz, (b) modulador acusto – óptico, (c) acoplamiento a fibra óptica, (d) acopladores 50:50 – división de haz, (e) brazos del interferómetro – sensores de fibra óptica y brazo de referencia, (f) acopladores 50:50 – combinación de haz para la obtención de la señal interferométrica, (g) detección balanceada de la señal interferométrica, (h) conversión a frecuencia intermedia y acondicionamiento de la señal portadora, (i) sistema de adquisición multinacional y procesamiento digital.

Una vez que los haces de luz (1er y 2o orden) recorren los múltiples sensores de fibra y el brazo de referencia, pasan a una etapa en donde la luz que llega de cada uno de los sensores se combina con la del brazo de referencia para formar señal de interferencia correspondiente a cada sensor (Fig. 4.3f). Estas señales ópticas son convertidas a señales eléctricas por medio de detectores balanceados (Fig. 4.3g). Como resultado de la interferencia de los dos haces de diferentes frecuencias ópticas que recorren los brazos del interferómetro, la señal eléctrica obtenida a la salida de los fotodetectores es una portadora con una frecuencia de 80 MHz que contiene codificada en su fase la información de la medida tomada por los sensores. De esta forma, se obtiene una señal portadora modulada por cada sensor. Estas señales deben ser acondicionadas y demoduladas para poder obtener la medida correspondiente a cada uno de ellos.

Cada una de las portadoras es llevada a una frecuencia intermedia de 5 MHz a través de un mezclado con otra señal de 75 MHz de frecuencia (Fig. 4.3h). Posteriormente cada señal portadora, ahora de 5 MHz, es filtrada por medio de un filtro paso-banda para luego ser digitalizada (Fig. 4.3i). La digitalización se realiza con un sistema de adquisición modelo PXI-5105 de National Instruments; el cual, permite digitalizar hasta ocho canales simultáneamente a una velocidad de muestreo de hasta 60 MS/s. Una vez que las señales portadoras han sido digitalizadas se realiza una demodulación digital a cada una de ellas por medio de un instrumento virtual (IV) implementado en LabVIEW.

Aunque el sistema de adquisición y procesamiento utilizado en este instrumento de medida ofrece la posibilidad de implementar hasta un máximo de ocho sensores/canales, para la realización de esta investigación se implementó un sistema de cuatro sensores/canales, ya que es una cantidad representativa que permite realizar una prueba de concepto desde una aproximación más simple pero que además, es suficiente para realizar la localización de fuentes de EA, como se verá más adelante en los resultados de los ensayos y pruebas experimentales.

La demodulación digital por medio de instrumentación virtual ofrece grandes ventajas, especialmente en un sistema complejo y con varios canales como el aquí propuesto, ya que utilizando un solo IV se pueden demodular todos los canales de forma rápida, simplificando una tarea que de otra forma sería muy difícil de realizar dada la cantidad de canales y la complejidad que conlleva la manipulación de señales de RF

durante el proceso de demodulación [4.11]–[4.15]. Asimismo, es posible acondicionar las señales por medio de procesamiento digital, lo que permite reducir el tamaño del sistema de instrumentación. En la Fig. 4.4 se muestra el esquema de bloques simplificado del IV desarrollado para la demodulación de fase la señal portadora.

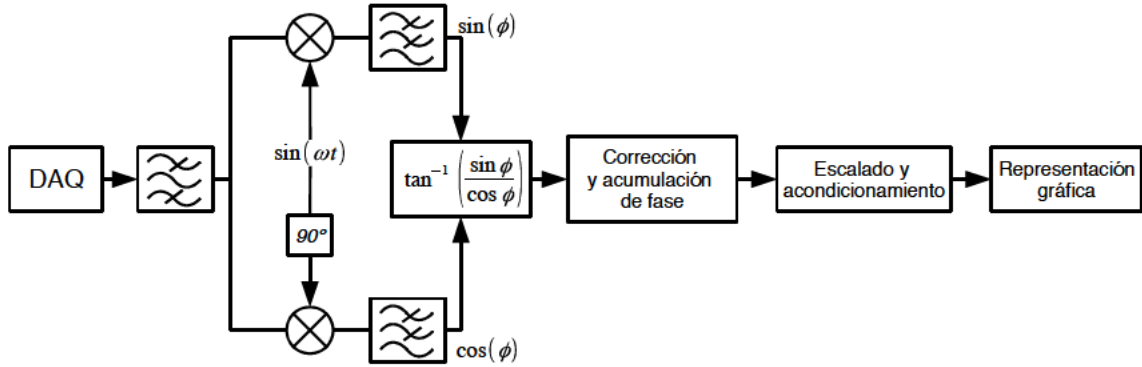


Figura 4.4. Diagrama de bloques simplificado del instrumento virtual desarrollado para la demodulación I/Q de la señal portadora de cada canal.

El procedimiento que realiza el IV mostrado en el diagrama de la Fig. 4.4 se lleva a cabo para cada uno de los canales del sistema de instrumentación. Este IV es un demodulador digital en fase en cuadratura (I/Q) que utiliza la función trigonométrica arco-tangente para recuperar la información que se encuentra codificada en la fase de la señal portadora [4.16], [4.17]. Como se puede observar, este IV incluye además una etapa de corrección y acumulación de fase que se encarga, por una parte, de corregir los saltos de 2π rad que se producen como resultado del rango limitado de la función arco-tangente cuando tienen lugar derivas de gran amplitud en los sensores; las cuales, pueden ser ocasionadas p. ej. por cambios de temperatura o por vibraciones de gran amplitud. Por otra parte, una vez que se corrigen las discontinuidades mencionadas anteriormente, un acumulador de fase cuenta las franjas con el fin de expandir el rango del instrumento más allá de 2π rad en la medida de fase.

Con la implementación de este nuevo sistema de instrumentación de cuatro sensores/canales se pretende detectar simultáneamente EA con una resolución similar a la alcanzada con el sistema de un solo canal, en el orden de 1 Pa.

4.4 Caracterización del sistema de instrumentación

La caracterización del sistema de instrumentación se ha realizado de forma individual para algunos de sus componentes fundamentales, como lo son la fuente de luz láser y el demodulador digital de fase, con el objetivo de evaluar sus prestaciones de una forma aislada y así conocer su impacto una vez sean implementados en el sistema de instrumentación. Asimismo, una vez implementado el sistema de instrumentación completo se realizó una caracterización del mismo en la misma plataforma de ensayos acústicos utilizada en la caracterización del sensor de fibra óptica y que fue descrita en el capítulo 3.

4.4.1 Caracterización de la fuente de luz láser

La primera prueba realizada con el dispositivo láser fue utilizar un interferómetro de Michelson en espacio libre montado sobre una mesa óptica, a fin de observar el comportamiento del dispositivo láser en cuanto a su coherencia. En esta prueba se introdujeron diferencias de camino óptico desde 0 hasta 2 m y se observó que prácticamente no hubo cambios en el contraste de la señal de interferencia. Dado que la diferencia de camino óptico que se espera conseguir en el sistema interferométrico de fibra será del orden de centímetros, se puede afirmar que el láser es lo suficientemente coherente para funcionar en el sistema.

A continuación se presentan en detalle otros ensayos realizados para conocer otras características como el espectro óptico del láser, ruido de fase, entre otras.

4.4.1.1 Medida del espectro óptico y longitud de onda

En esta caracterización se tomaron medidas del espectro de emisión del láser con la ayuda de un analizador de espectro óptico. Dadas las características incompatibles del dispositivo láser (salida a espacio libre) y del analizador de espectro (SA) óptico (entrada con conector de fibra FC/PC), fue necesario acoplar el haz láser de salida a fibra óptica utilizando un colimador y un posicionador de dos ejes; tal y como se muestra en la Fig.

4.5. Además, la potencia de salida del láser está cerca del límite soportado por el instrumento de medida, por lo que deliberadamente se introdujeron pérdidas de acoplo, a fin de mantener la potencia óptica de entrada dentro de los límites soportados por instrumento.

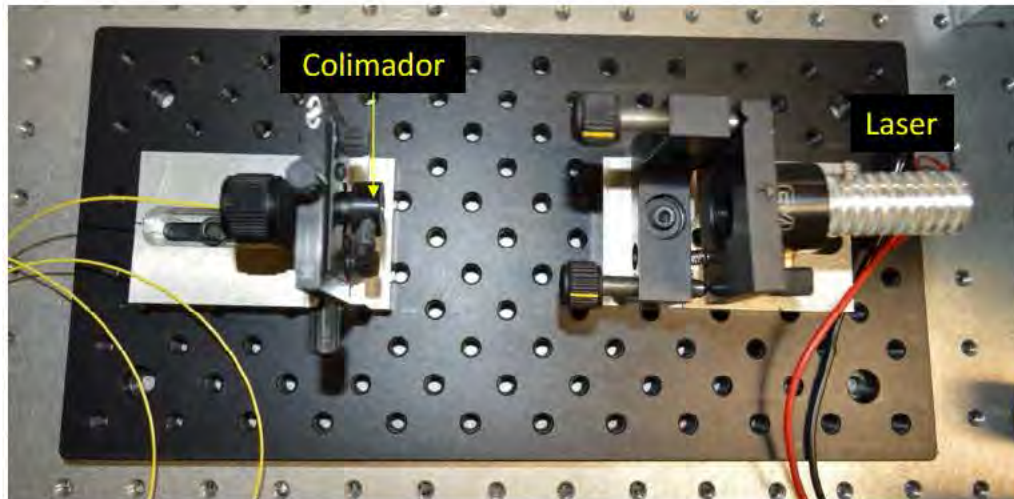


Figura 4.5. Montaje utilizado para acoplar el láser a fibra óptica durante las medidas con el SA.

Los resultados de esta medición son mostrados en la Fig. 4.6. Las medidas fueron tomadas con una resolución de 0.05 nm, abarcando un rango de 60 nm centrados en la longitud de onda de 530 nm.

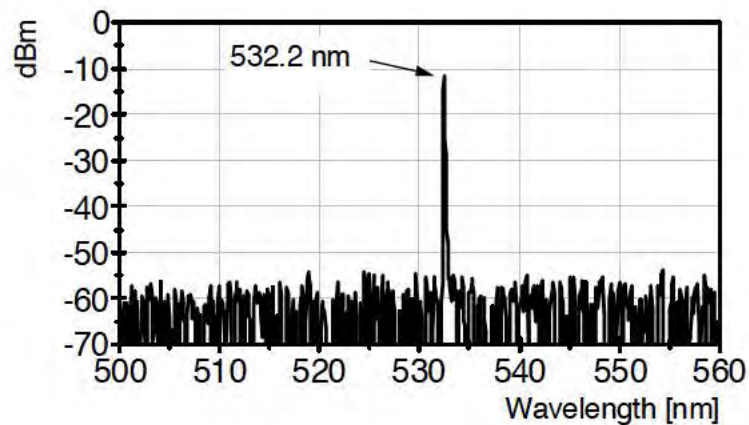


Figura 4.6. Espectro óptico del láser.

Aunque se conoce de antemano que la longitud de onda característica del dispositivo láser se encuentra en el espectro visible, alrededor de 532 nm; se puede comprobar en los resultados de la medidas realizadas que el pico de emisión está situado en 532.2 nm. Asimismo, se puede apreciar que el dispositivo presenta un solo pico de emisión.

4.4.1.2 Medida de la potencia óptica y estabilidad del láser

Durante esta prueba se tomaron medidas periódicamente de la potencia óptica emitida por el dispositivo, durante un intervalo de tiempo de 2 horas. Los resultados se pueden observar en la Fig. 4.7.

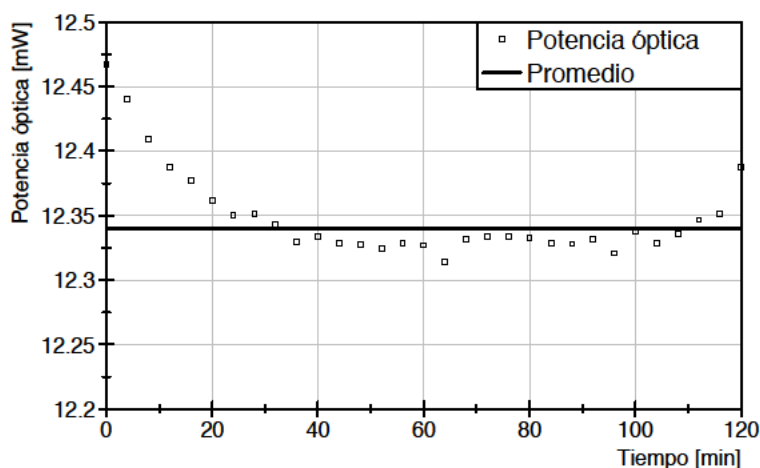


Figura 4.7. Potencia óptica emitida por el dispositivo láser.

El dispositivo láser no dispone de un sistema de estabilización en lazo cerrado por lo que, como se puede observar en el gráfico anterior, tarda un tiempo en alcanzar un valor de potencia óptica estable. Aun así, la desviación máxima encontrada en las medidas fue de $\sim 0.91\%$ de la potencia media; la cual, según las medidas tomadas, es de 12.35 mW. Con base en estos resultados se puede decir que el dispositivo presenta una estabilidad en la potencia óptica de salida de 1% en 2 horas.

4.4.1.3 Caracterización del ruido de fase

El ruido de fase en un láser es una fuente fundamental de ruido dentro de un sistema interferométrico. Este ruido surge de las variaciones aleatorias de la frecuencia óptica del láser, las cuales se convierten en variaciones de fase a la salida del interferómetro [4.18]. Esto se puede observar más claramente si en la ec. 2.4 se substituye la longitud de onda por su equivalente en frecuencia óptica ($\lambda = c/\nu$), derivando la misma ecuación se obtiene que:

$$d\phi = \frac{2\pi\eta\Delta L d\nu}{c} \quad (4.2)$$

donde se puede observar que las variaciones aleatorias de frecuencia óptica en el láser $d\nu$ producirán cambios aleatorios de la fase óptica ($d\phi$) que además serán proporcionales a la diferencia de camino óptico ΔL . Por consiguiente, es necesario minimizar, en lo posible, la diferencia de camino óptico en el interferómetro. Sin embargo, en un sistema interferométrico de FO resulta complicado igualar la longitud de los brazos con el fin de obtener una diferencia de camino óptico $\Delta L = 0$, más aún cuando se trata de un interferómetro con múltiples brazos como el propuesto en esta tesis. En consecuencia, resulta fundamental utilizar un láser con de bajo ruido de fase.

La medición del ruido de fase del láser se realizó empleando el esquema de la Fig. 4.8. En este, se utiliza un interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica en el que se ha introducido una diferencia de longitud de 80 m entre los brazos con el fin de magnificar los efectos causados por las variaciones de frecuencia óptica del láser. El interferómetro se colocó dentro de un contenedor construido con polietileno expandido y todo esto, fue colocado sobre una mesa óptica a fin de reducir los efectos causados por vibraciones y otras perturbaciones.

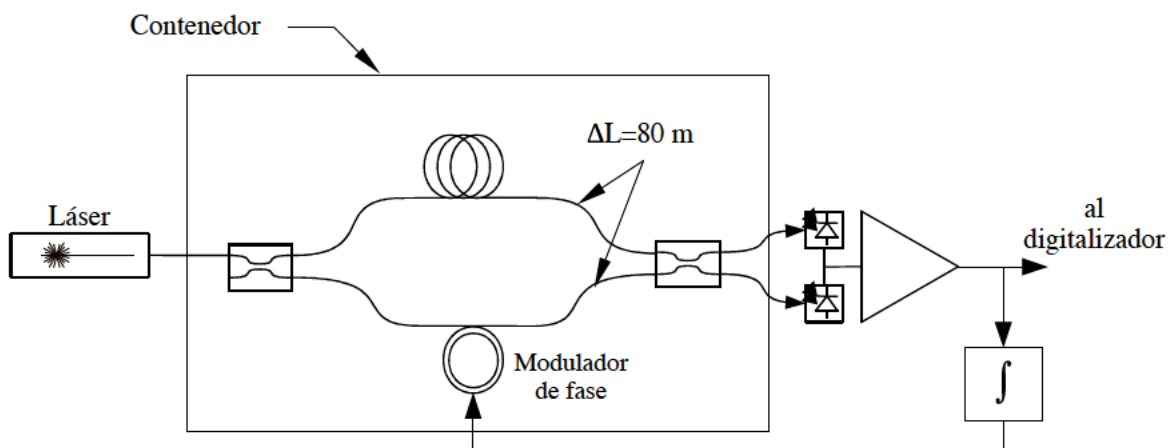


Figura 4.8. Esquema utilizado para la medición del ruido de fase del láser.

En el esquema mostrado en la Fig. 4.8 se realiza una estabilización homodina a fin de obtener una relación lineal a la salida del detector. De esta forma, el ruido observado en la señal eléctrica de fotocorriente será proporcional al ruido de fase del láser [4.19]. El resultado de estas medidas se muestra en la Fig. 4.9.

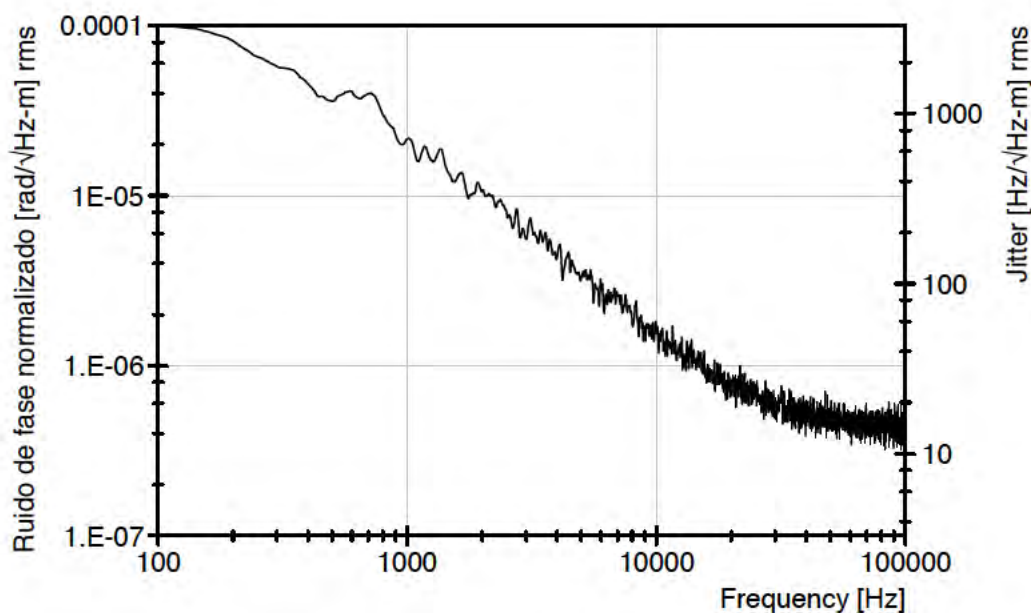


Figura 4.9. Ruido de fase del láser normalizado a 1 m de diferencia de camino óptico.

Se puede observar que en los resultados que a 100 kHz el láser presenta un ruido de tan solo $0.5 \mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$ en un metro de diferencia de camino óptico. Con un ruido tan bajo como este, si se logra mantener la diferencia de camino óptico en el orden de p. ej. $<10 \text{ cm}$, lo cual es factible, el nivel de ruido en el sistema estaría por debajo de $0.05 \mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$, por lo que sería prácticamente inapreciable.

Finalmente, en la tabla 4.1 se presenta un resumen de los resultados de la caracterización del dispositivo láser.

Parámetro	Magnitud	
Potencia óptica	10 mW	
Longitud de onda	532,2 nm	
Estabilidad	1% (en 2 horas)	
Ruido de fase	@ 10 kHz	$1,5 \mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz-m}}$
	@ 100 kHz	$0,5 \mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz-m}}$

Tabla 4.1. Características de la fuente de luz

4.4.2 Caracterización del demodulador digital de fase

Anteriormente en el apartado 4.3 se describió el sistema de instrumentación propuesto y se pudo observar que este, se compone de una etapa optoelectrónica y otra de

adquisición de datos y procesamiento digital en la cual se efectúa una demodulación de fase para recuperar la medida de los sensores. En este apartado se realiza una caracterización del demodulador digital y el sistema adquisición en su conjunto, con el fin de conocer el alcance que se puede obtener en la medida de la fase.

4.4.2.1 Estimación de la resolución y el rango dinámico del demodulador digital de fase

El límite de resolución que se puede alcanzar con el demodulador digital de fase está determinado por las características del sistema de adquisición, ya que su ruido de entrada será añadido a la señal portadora. Debido a que el ángulo de fase en el demodulador (Fig. 4.4) se obtiene a partir de la función arco-tangente, se tiene que la resolución limitada por el ruido (N), el cual está escalado a amplitud de la señal portadora (S), cuando $S \gg N$ será:

$$\tan^{-1}\left(\frac{\sin(N/S)}{\cos(N/S)}\right) = \frac{N}{S} \quad (4.3)$$

De esta forma, la mejor resolución se obtendrá cuando la amplitud de la señal portadora cubra el rango completo de entrada del digitalizador, es decir 1Vpp. En ese caso y teniendo en cuenta las características del fabricante del sistema de adquisición (modelo NI-PXI-5105), el cual especifica un ruido típico de $300 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ en cada canal, se tendrá que la mínima fase detectable limitada únicamente por el sistema de adquisición será $\sim 0,6 \text{ mrad}_{\text{rms}}$. Tomando los datos de la sensibilidad del sensor de FO (tabla 3.2), se tiene que la resolución corresponde a una presión acústica de $\sim 0,7 \text{ mPa}_{\text{rms}}$.

Por otra parte se realizó además una estimación del rango dinámico del demodulador de fase. Partiendo del hecho que la señal interferométrica es una portadora (H) modulada en fase y asumiendo que la señal modulante es un solo tono de frecuencia f_m , se tiene que la portadora presenta la forma:

$$H = V \cdot \cos(2\pi f_c + D_{\text{max}} \sin(2\pi f_m)) \quad (4.4)$$

donde V y f_c corresponden a la amplitud y frecuencia de la señal portadora respectivamente, D_{max} y f_m corresponden a la desviación máxima de fase y la frecuencia de la señal moduladora respectivamente. Se emplea la regla de Carson para estimar el ancho de banda de la señal portadora y sus bandas laterales producidas por la modulación

de fase [4.20]. La limitación en el ancho de banda se establece cuando este sea igual $2 f_c$. De esta forma se obtiene que [4.21]:

$$D_{max} = \frac{f_c}{f_m} - 1 \quad (4.5)$$

Se puede observar en la ecuación anterior que la máxima amplitud de fase que se puede recuperar se reducirá conforme la frecuencia de la señal moduladora se acerca a la frecuencia de la señal portadora. En la Fig. 4.10 se representa la amplitud máxima D_{max} en función de la frecuencia de la señal moduladora normalizada a la frecuencia de la señal portadora (f_m / f_c).

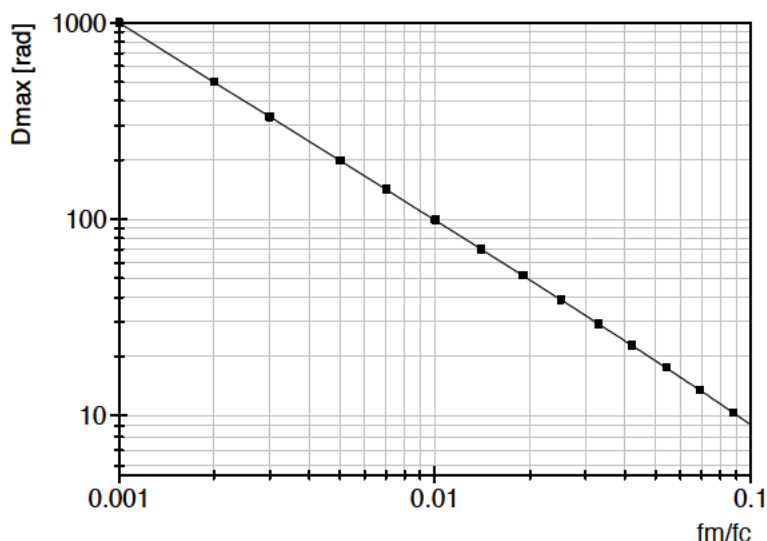


Figura 4.10. Límite superior en el rango dinámico del demodulador de fase.

Teniendo en cuenta que la frecuencia de la señal portadora de cada canal en el sistema de instrumentación es de 5 MHz y que las frecuencias de ultrasonido que se desean detectar se encuentran en torno a 150 kHz, se estima que la amplitud máxima de fase que se puede llegar a demodular ($f_m / f_c = 0,03$ en la Fig. 4.3) es de $32,3 \text{ rad}_{pk}$ ($22,8 \text{ rad}_{rms}$); lo cual, corresponde a una presión acústica de $17,5 \text{ kPa}_{rms}$ ($\sim 25 \text{ kPa}_{pk}$). Es importante mencionar que en esta estimación se ha considerado una señal modulante con un solo tono de frecuencia y por tanto no es válida para una señal compleja que contenga múltiples componentes de frecuencia de su espectro. Aunque de cara a la aplicación final es de esperarse un límite inferior al calculado, a grandes rasgos se obtiene una idea de la magnitud que se puede llegar a medir con el sistema.

Con base en los resultados anteriores, se calcula el rango dinámico máximo que se puede llegar a obtener en el demodulador de fase: $10 \cdot \log(17,5\text{kPa}/0,6\text{Pa}) = \sim 44\text{dB}$.

4.4.2.2 Calibración de la medida de fase

Para comprobar que el demodulador recupera correctamente la fase de la señal portadora, se realizaron medidas aplicando una señal con una modulación de fase calibrada a la entrada del sistema de adquisición y procesamiento. En las medidas se utilizó un generador de señales modelo: RIGOL DG4162, que cuenta con la capacidad para proporcionar una señal portadora modulada en fase a una frecuencia de modulación máxima de 50 kHz.

El generador se configuró para proporcionar una portadora de 5 MHz con una amplitud de 1Vpp con el fin de abarcar el rango completo de entrada del digitalizador. La señal moduladora utilizada fue una sinusoidal con una frecuencia de 50 kHz (el máximo soportado por el generador). Durante la calibración se tomaron medidas de fase para diferentes valores de amplitud de la señal moduladora, incrementando la amplitud de la misma en intervalos de 5° hasta cubrir un rango de $\pm 90^\circ$. Los resultados de estas medidas se muestran en la Fig. 4.11.

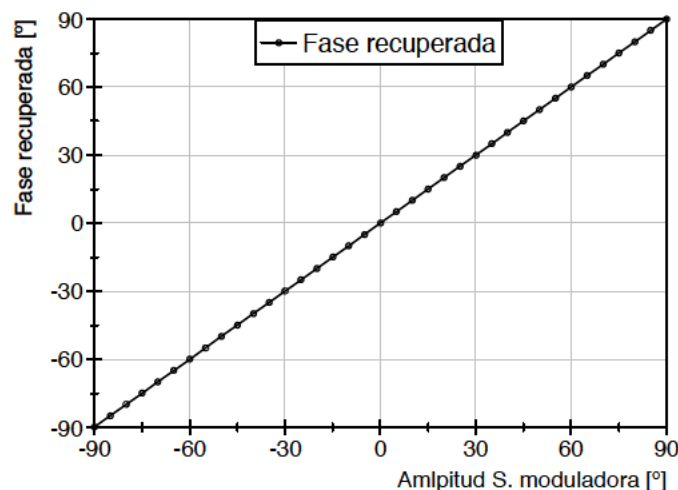


Figura 4.11. Curva de calibración del demodulador de fase.

4.4.3 Estudio del ruido en el sistema y medida de la resolución

Anteriormente se han analizado varias fuentes de ruido en el sistema, como lo son el ruido de ruido de entrada en el sistema de adquisición y el ruido de fase del láser. En este apartado se analizarán los anteriormente mencionados en su conjunto con otras fuentes como el ruido acoplado en la etapa de conversión a frecuencia intermedia de la portadora, el ruido en los módulos fotodetectores, entre otros.

Para realizar la estimación del ruido de disparo en la fibra se tomaron medidas de la potencia óptica que llega a los fotodetectores; esta potencia es de ~ 0.5 mW en cada uno de los cuatro canales. Gran parte de la potencia óptica se pierde en la etapa del modulador acusto-óptico y en el acoplamiento al sistema de fibra, en donde se llegan a acoplar ~ 3 mW de potencia óptica. Por tal motivo, esta etapa del sistema viene a convertirse en un punto crítico en el que se podrían introducir mejoras en un futuro a fin de conseguir un mejor balance de potencia. Teniendo en cuenta la potencia óptica medida, se calcula la corriente de ruido *shot* (i_s) utilizando la ec. 4.6.

$$i_s = \sqrt{(2qI_0)} \quad (4.6)$$

donde q es la carga del electrón e I_0 , la foto-corriente promedio en el fotodetector. Se obtiene que la corriente de ruido es $12,6$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$. La detección de la portadora óptica heterodina se realiza con detectores balanceados (modelo Thorlabs PDB 410A) con una ganancia de transimpedancia de 25k V/A , por lo que se obtendrá una densidad espectral de ruido de $0,32$ $\mu\text{V}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$ a la salida de los módulos fotodetectores. Este ruido estará presente a ambos lados de la portadora y afectará las bandas laterales. Debido a que en la modulación de fase el espectro es simétrico alrededor de la portadora, la potencia de ruido será el doble de la observada a un solo lado de la portadora. Esto es un factor $\sqrt{2}$ del ruido en tensión [4.22]; por tanto, teniendo en cuenta esto y utilizando la ec. (4.4) para el máximo rango de entrada del digitalizador, se estima que el ruido es de 0.9 $\mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$ a la salida del demodulador.

Por otra parte se realizaron medidas del ruido a la salida de los módulos fotodetectores, las cuales, se presentan en el anexo C. En estas medidas se encontró que el nivel de ruido presente alrededor de los 80 MHz de frecuencia, que es la zona donde se

encontrará la portadora y sus bandas laterales antes de la etapa de conversión a frecuencia intermedia, es de -120 dBm/Hz; lo cual corresponde a un nivel de ruido en tensión de $0,22 \mu\text{V}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$. Esto equivale a $0,63 \mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$ de ruido a la salida del demodulador de fase.

Otra de las fuentes de ruido que puede llegar a ser significativa en el sistema es el ruido de fase del generador de funciones, ya que será introducido al sistema de instrumentación a través del modulador acusto-óptico y también en la etapa de conversión a frecuencia intermedia a través del mezclado que se realiza con la señal portadora. Para conocer la magnitud de este ruido se realizaron medidas del ruido de fase del generador. Estas son presentadas en detalle en el anexo D. En dichas medidas se encontró que el nivel de ruido introducido en el sistema debido generador de funciones, es de $0,043 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ lo que corresponde a $0,12 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ a la salida del demodulador de fase.

A modo de resumen se presenta la tabla 4.2, en la que se muestran todas las componentes de ruido mencionadas anteriormente junto con su magnitud.

Componente de ruido	Magnitud [$\mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$]
Ruido de fase del generador de funciones	0,12
Ruido de salida en el módulo fotodetector	0,63
Ruido de fase del láser	0,05
Ruido <i>shot</i>	0,9

Tabla 4.2. Componentes de ruido en el sistema

Finalmente, la fase mínima detectable en el sistema se calcula a partir de la suma de la potencia de las componentes de ruido calculadas anteriormente, esto es:

$$\phi_{\min} = \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2 + \dots + \phi_n^2} \quad (4.7)$$

donde ϕ_n son cada una de las componentes de ruido. Aplicando la ecuación anterior utilizando los valores de la tabla 4.2, se obtiene una densidad espectral de ruido de $1,1 \mu\text{rad}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$. Teniendo en cuenta que el ancho de banda necesario en el sistema para la medida de las EA es de 200 kHz, se estima que la el ruido estará en torno a $\sim 500 \mu\text{rad}_{\text{rms}}$.

Comparando el ruido total en la etapa analógica del sistema con el ruido del DAQ calculado anteriormente en la sección 4.4.2.1, el cual es de $0,6 \text{ mrad}_{\text{rms}}$, se concluye que la resolución está limitada principalmente por ruido del DAQ, aunque no está muy lejos del ruido de la etapa analógica del sistema. La fase mínima detectable se calcula utilizando nuevamente la ec. (4.7) para sumar las potencias de estos dos niveles de ruido (etapa analógica y sistema de adquisición). Este se estima en $\sim 0,8 \text{ mrad}_{\text{rms}}$.

En la Fig. 4.12 se muestran la mínima fase detectable en función de la amplitud de la señal portadora. También se muestran en la misma figura las componentes de las fuentes de ruido que han sido calculadas anteriormente y que se encuentran, además, resumidas en la tabla 4.2.

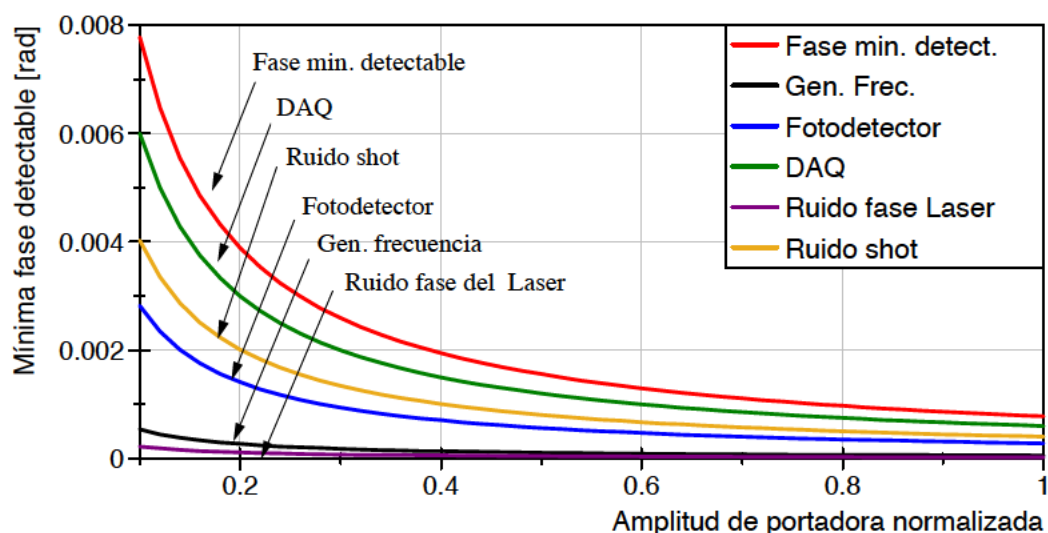


Figura 4.12. Estimación de la fase mínima detectable en el sistema.

En el gráfico anterior se puede observar cómo se degrada la resolución conforme disminuye la amplitud de la señal portadora. Esta degradación es especialmente notable cuando la amplitud de la portadora cae por debajo del 50%; sin embargo, no se produce un cambio significativo cuando la amplitud de la portadora está por encima de este valor. Por tal razón, la condición de mantener el nivel de señal por encima del 50% viene a convertirse en un aspecto importante en el sistema de instrumentación. Un ejemplo típico que puede llevar esta situación y producir una degradación de la resolución en el sistema, es el desvanecimiento de la señal por causa de la polarización. Este, produce una atenuación de la señal interferométrica debido a cambios de polarización en los brazos

del interferómetro. Por ello, se incluyeron controladores de polarización en cada uno de brazos de medida a fin mantener unos niveles de señal óptimos.

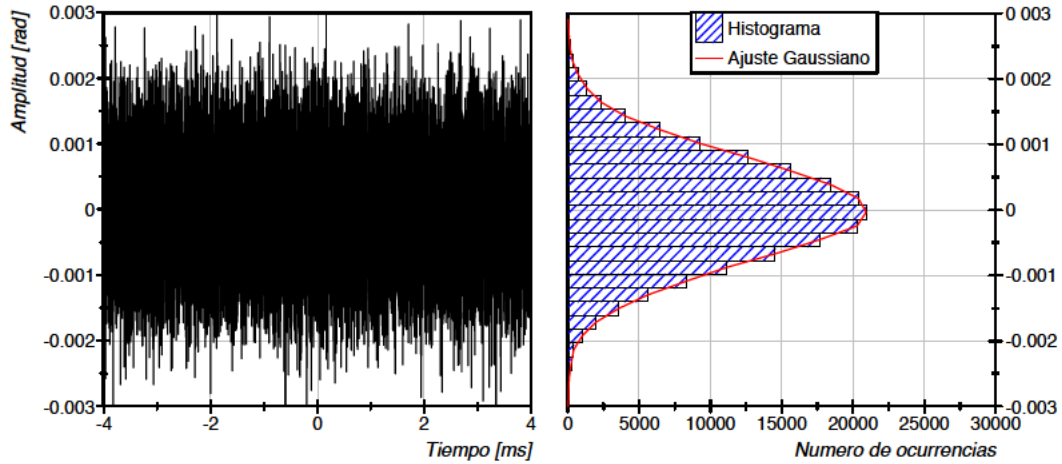


Figura 4.13. Fase mínima detectable en el sistema.

En el gráfico de la Fig.4.13 se muestra el nivel de ruido típico que se observa en los canales del interferómetro. Se puede observar en ese mismo gráfico que el ruido presenta una distribución gaussiana. Además, el nivel de ruido medido a partir de las 200 mil muestras representadas en el gráfico de la Fig. 4.13 es de $786 \mu\text{rad}_{\text{rms}}$, lo que se aproxima en gran medida al valor estimado anteriormente ($\sim 0,8 \text{ mrad}_{\text{rms}}$).

4.4.4 Detección de emisiones acústicas

Como parte final de la caracterización del sistema se realizó un ensayo en la que se detectaron señales de EA de ultrasonido en cada uno de los canales. Para el experimento se utilizó la plataforma de ensayos acústicos en agua que se describe en el capítulo 3 y en la cual se realizó la caracterización del sensor de FO. En el ensayo se colocó un transductor de ultrasonidos dentro del tanque de la plataforma junto con un sensor de FO, ambos separados a 15 cm de distancia. Se incluyó además un hidrófono colocado a la misma distancia de la fuente de EA con el fin de monitorizar las señales acústicas generadas. En la Fig. 4.14 se muestran las señales detectadas durante las medidas.

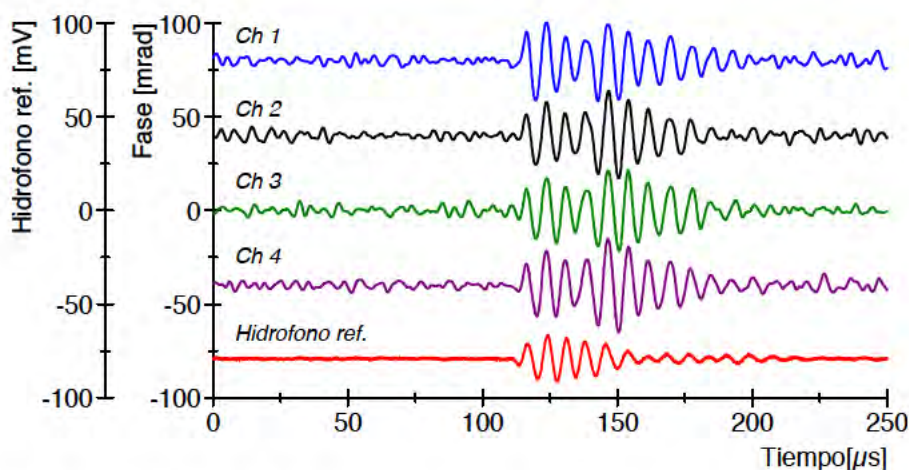


Figura 4.14. Detección de EA en cada uno de los canales del sistema de instrumentación.

En el gráfico anterior se observa una señal acústica detectada por el mismo sensor de FO conectado a cada uno de los 4 canales, junto a la señal detectada por un hidrófono de referencia. La señal de 150 kHz detectada por el hidrófono corresponde a una presión acústica de 25 Pa_{p-p}, esta se observa como una amplitud de ~50 mrad con el sensor de FO. Aunque durante esta prueba no se efectuó una detección simultánea de EA, se pudo comprobar que el sistema es capaz de detectar EA de ultrasonidos a las frecuencias de interés. Más adelante, en el capítulo 5, se presentan los resultados de medidas de EA de la misma frecuencia detectadas simultáneamente con varios sensores.

Capítulo 5

Resultados experimentales orientados hacia la aplicación

5.1 Introducción

Una vez que ha sido implementado y caracterizado el sistema de instrumentación, se decide validar su funcionamiento a través de pruebas experimentales. Una parte de estas pruebas está dedicada a la validación del sensor de FO. Estas fueron realizadas en una plataforma en la que se generan DP en aceite de transformador por medio de electrodos alimentados con alta tensión. Por otra parte, se realizaron medidas de EA con el sistema de instrumentación multicanal utilizando varios sensores de FO de forma simultánea con el fin de localizar la posición de la fuente de emisión por medio de trilateración. En este capítulo, se presentan los resultados de estas pruebas y su respectivo análisis.

5.2 Detección de descargas parciales en experimentos de alta tensión

Este experimento fue llevado a cabo en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT), en el que se dispone de una plataforma de generación de DP en aceite de transformador. En esta instalación se pueden generar varios tipos de DP de forma controlada y permite, además, su detección de forma eléctrica y acústica, de tal forma que se pueden monitorizar parámetros como el tipo de descarga, la magnitud eléctrica de la misma e, inclusive, su localización [5.1].

Esta plataforma ha sido diseñada de forma conjunta, en una colaboración entre el Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser (GOTL) y el grupo de Diagnóstico de Máquinas Eléctricas y Materiales Aislantes (DIAMAT) de la Universidad Carlos III de Madrid.

5.2.1 Descripción del experimento

La plataforma de generación de DP en aceite de transformador está construida de acuerdo con la norma IEC 60270 [5.2], su esquema eléctrico es el que se muestra en la Fig. 5.1 [5.1]. Está conformada por un tanque lleno de aceite de transformador, el cual ha sido degradado previamente mediante su exposición directa al medio ambiente durante varios meses. Dentro del tanque, sumergidos en el aceite, se encuentran dos configuraciones diferentes de electrodos con los que se van a generar dos tipos de DP, con el fin de obtener una muestra representativa de las descargas generadas en un transformador. Estas dos configuraciones son: plano – plano, para generar DP internas (Fig. 5.2a), y punta – plano, para generar DP superficiales (Fig. 5.2b).

5.2 Detección de descargas parciales en experimentos de alta tensión

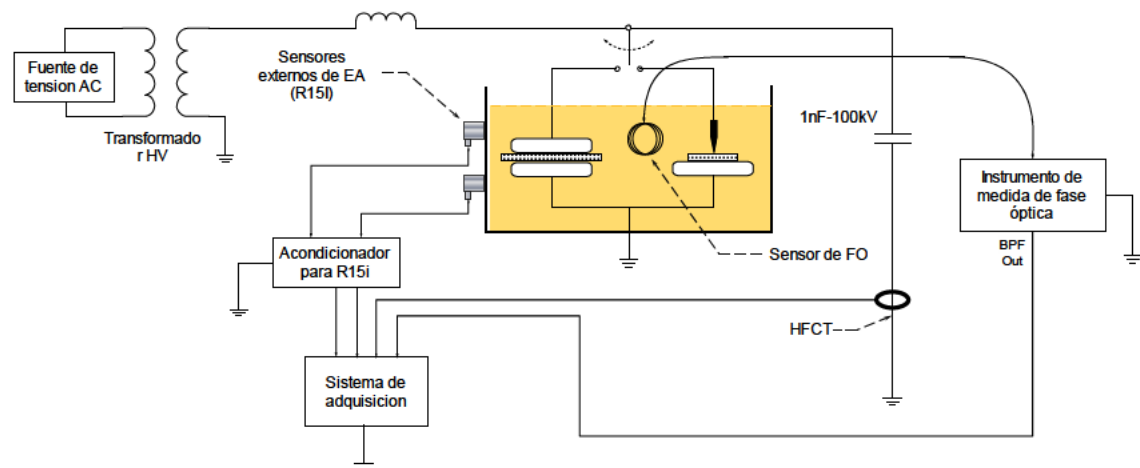


Figura 5.1. Esquema eléctrico del experimento de generación y detección de descargas parciales en aceite de transformador.

Las descargas de tipo internas ocurren en cavidades, en general gaseosas, que se encuentran en el interior de un dieléctrico, mientras que las DP superficiales, se producen en la superficie de un dieléctrico o interfaz entre dos dieléctricos [5.3]. Los electrodos utilizados en la configuración plano – plano son dos discos con unas dimensiones de 7.5 cm de radio y 2 cm de altura. Uno de estos electrodos se encuentra conectado a alta tensión y el otro está conectado a tierra. En medio de los dos electrodos se encuentran introducidas ocho láminas de papel impregnado de aceite, del mismo tipo que el utilizado en el sistema de aislamiento de los transformadores. Con esta configuración las DP internas se producirán en las burbujas microscópicas que se forman entre las láminas de papel. Para el caso de la configuración punta – plano el electrodo de baja tensión es idéntico al utilizado en la configuración plano – plano, y el electrodo conectado a alta tensión es una aguja que se encuentra presionando 16 papeles aislantes con área mucho más pequeña que en el caso anterior, lo que proporcionara un camino de fácil ionización sobre la superficie del papel hacia el electrodo conectado a tierra, permitiendo así que se generen DP superficiales.

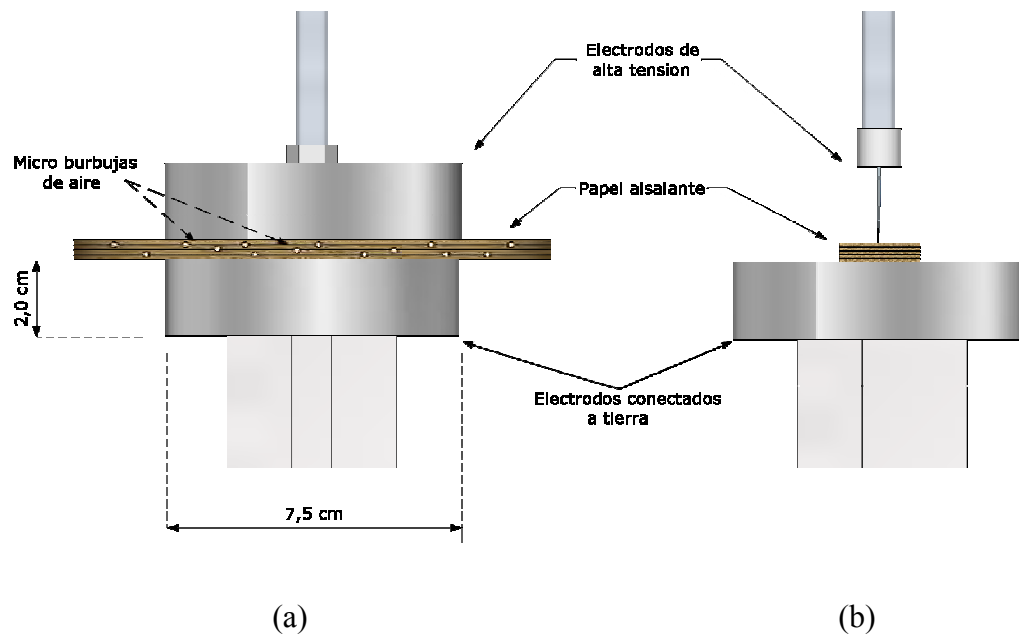


Figura 5.2. Objetos de ensayo utilizados en el experimento: (a) configuración plano – plano (generación de DP internas) y (b) configuración punta – plano (generación de DP superficiales).

La medición acústica de las DP generadas durante las pruebas fue realizada simultáneamente con un sensor interno de FO y un sensor externo modelo R15i. El sensor de FO se ubicó a 9 cm de la fuente de DP internas y a 15 cm de la fuente de DP superficiales. El sensor externo fue colocado a 15 cm de la fuente de DP en ambos casos. Adicionalmente se incluye un sensor eléctrico de DP en la plataforma experimental. Este último es un transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT) que se puede utilizar para monitorizar la actividad de DP, o también como referencia eléctrica de disparo si fuera necesario.

En este experimento las medidas fueron tomadas energizando solo un solo conjunto de electrodos a la vez, a fin de generar un solo tipo de DP en cada medida realizada. La tensión aplicada a los electrodos para conseguir generar las DP fue de 2 kV para el caso de DP internas y de 8 kV para caso de las DP superficiales.

En la Fig. 5.3 se observa la disposición de los sensores y los electrodos de generación de DP en el banco de pruebas. Asimismo, en la Fig. 5.4 se presenta una fotografía en la que se observa uno de los electrodos (configuración plano- plano) el sensor de FO y el sensor PZT externo.

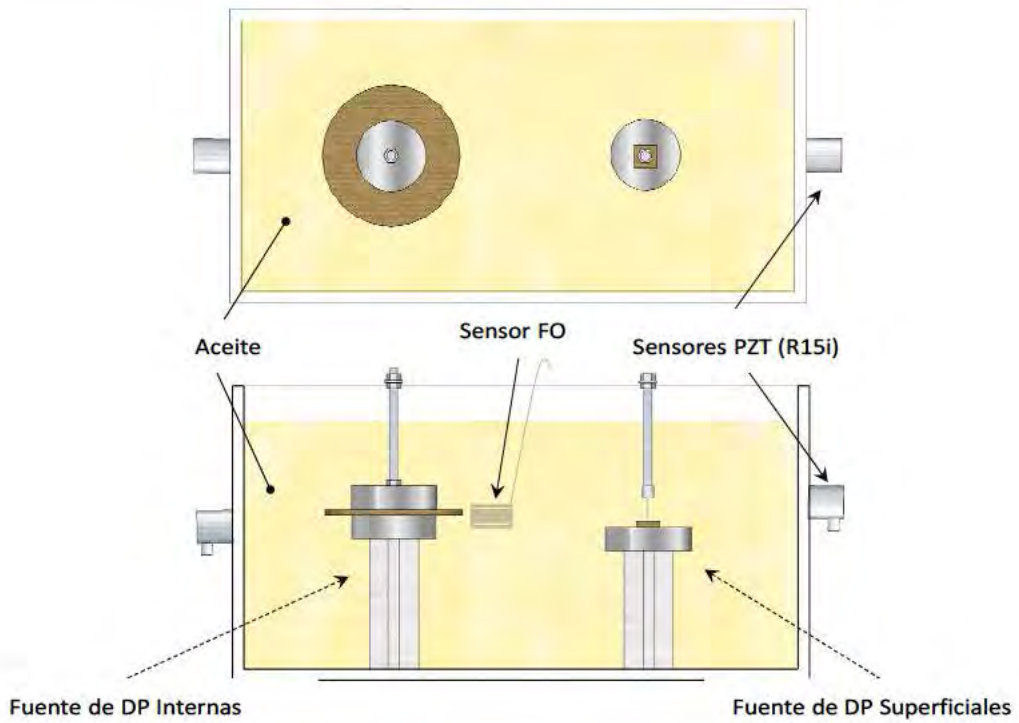


Figura 5.3. (a) Disposición de los sensores durante el experimento.

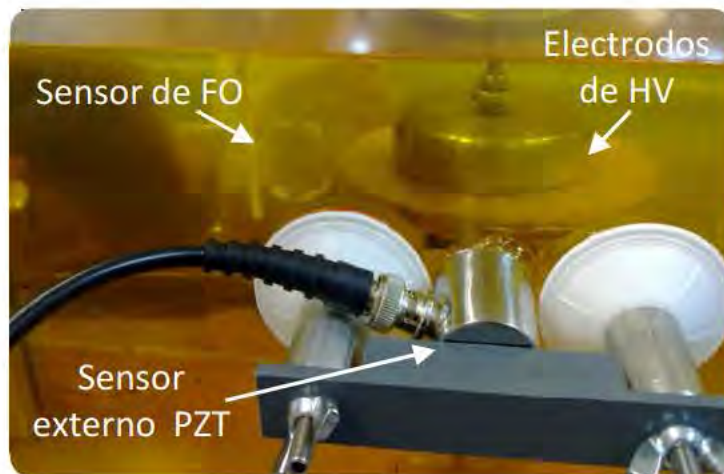


Figura 5.4. Fotografía de la plataforma de generación de DP, en el que se observa el sensor interno de FO, el conjunto de electrodos en configuración plano - plano y el sensor externo R15i.

Debido a que el objetivo de este experimento es el de validar el sensor de FO detectando señales reales de ultrasonido generadas por las DP, se utilizó para las medidas el sistema de instrumentación optoelectrónico de un solo canal con estabilización homodina, el cual, fue descrito anteriormente en el capítulo 3. No obstante, para facilitar

la puesta a punto del experimento en las instalaciones del LINEALT, se integró todo el sistema optoelectrónico en un instrumento portátil. En la Fig. 5.5 se puede observar una fotografía de la versión portátil del instrumento de un solo canal con sensor de FO.



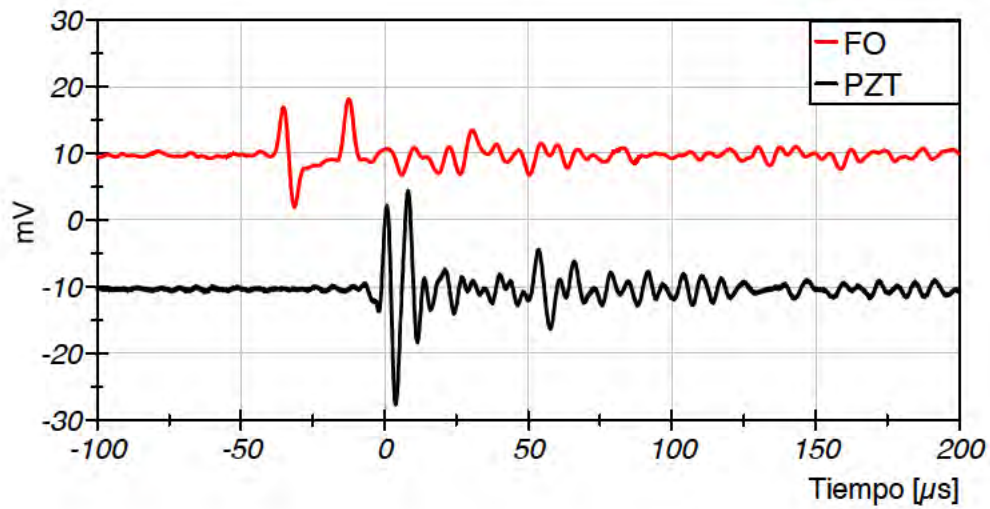
Figura 5.5. Fotografía de la versión portátil del instrumento de medida de un canal con sensor de FO.

5.2.2 Resultados experimentales de medidas acústicas de descargas parciales

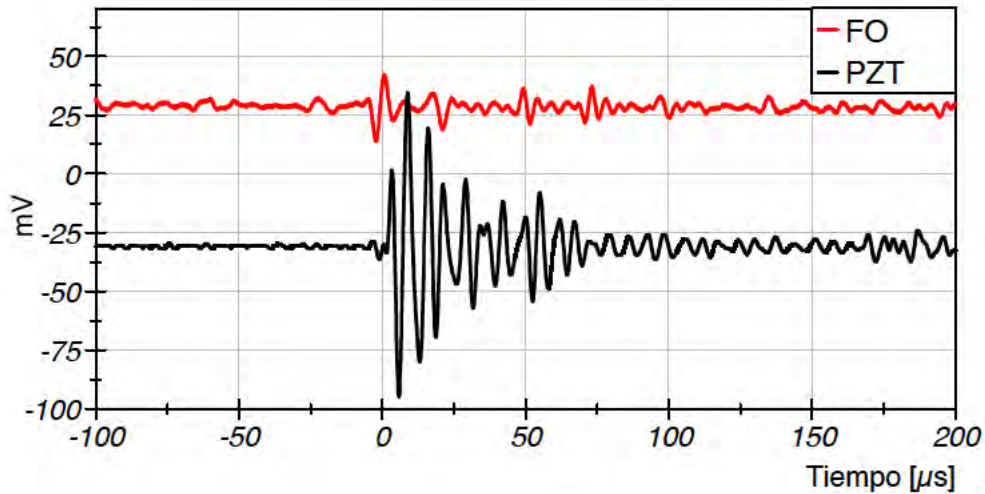
Durante el experimento el sensor de FO mostró la sensibilidad adecuada para detectar los dos tipos de DP. Los resultados mostrados en la figura 5.6a y 5.6b muestran el tipo de señales acústicas obtenidas durante las medidas de DP internas y superficiales respectivamente.

La magnitud de las señales registradas durante las medidas fue de $\sim 1,3$ Pa en el caso de las DP internas, y $\sim 2,5$ Pa en el caso de las DP superficiales.

En los resultados se puede observar una vez más el efecto la doble respuesta característica del sensor de FO. Esto se debe a que se utilizó un sensor de FO sin encapsulado, ya que al momento en que se realizó el experimento no se contaba con un encapsulado fabricado con PTFE u otro material adecuado para sumergirlo en el aceite de transformador.



(a)



(b)

Figura 5.6. Medida acústica de DP generadas en aceite de transformador. (a) Detección de descargas parciales de tipo internas y (b) descargas parciales superficiales.

Por otra parte, la diferencia entre la forma de onda registrada con el sensor externo y el de FO es atribuida a la diferencia de la respuesta en frecuencia entre ambos. Como se pudo observar en la caracterización del capítulo 3, mientras que el sensor de FO tiene una respuesta en frecuencia amplia, el sensor externo tiene una muy estrecha. Esto produce una respuesta transitoria más corta en el sensor de FO en comparación con la del sensor externo PZT.

5.3 Localización de fuentes de emisión acústica

5.3.1 Descripción del experimento

En este experimento se utilizó la plataforma de ensayos acústicos descrita en el capítulo 3 (sección 3.4.1.1), a fin de emular un entorno similar al que se puede encontrar en un transformador y generar EA desde diferentes posiciones dentro del tanque, para luego encontrar la posición de la fuente utilizando el sistema de instrumentación.

La configuración utilizada para la colocación de los sensores de FO está basada en la propuesta planteada en el capítulo 3 (Fig. 3.14), en la que se aprovecha el la direccionalidad de los sensores y su ángulo amplio de detección en el plano z - y para monitorizar un devanado de un transformador utilizando dos sensores de FO. De esta forma, en un transformador trifásico será necesario utilizar seis sensores, tal y como se muestra en la Fig. 5.7.

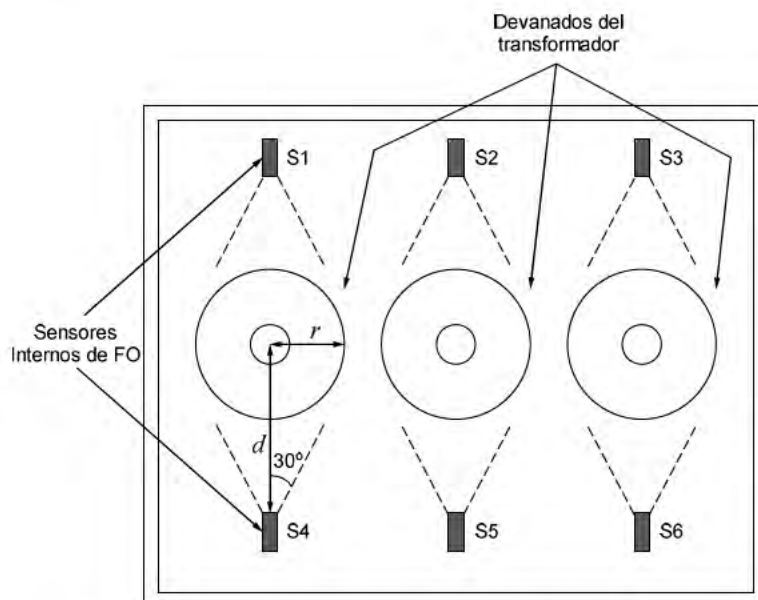
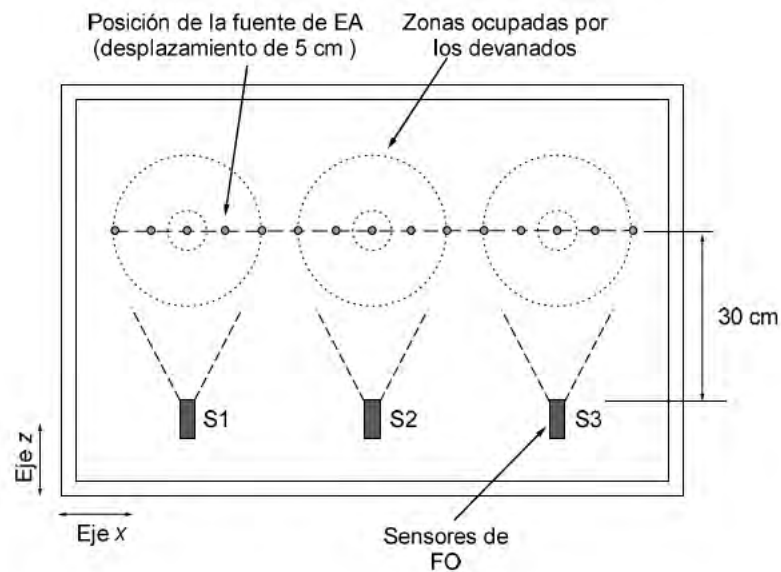
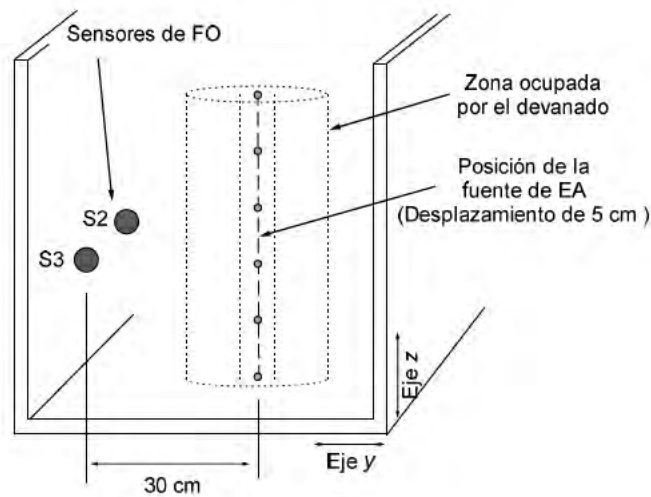


Figura 5.7. Configuración propuesta de la colocación interna de los sensores de FO para la monitorización de un transformador trifásico.

Como se puede observar en la Fig. 5.7, el tanque junto con los devanados colocados en el interior presentan una simetría especular. Por tanto, para hacer una prueba de concepto de la configuración de los sensores y realizar un experimento básico con fines de localización de fuentes de EA, se puede utilizar la plataforma experimental para emular solo la mitad del tanque, por lo que sería necesario utilizar solo tres sensores FO, de tal forma que se simplifica la configuración del experimento. Con este planteamiento, se llevó a cabo el montaje experimental que se muestra en la Fig. 5.8.



(a)



(b)

Figura 5.8. Arreglo experimental utilizado en los ensayos de localización de fuentes de EA. (a) Barrido en el eje x, (b) barrido en el eje z.

En la Fig. 5.9 se muestra una fotografía de la plataforma de ensayos en el que se pueden observar los sensores de FO y la fuente de EA. Estas fueron emitidas desde posiciones conocidas dentro del tanque colocando la fuente de EA sobre las zonas que ocuparían los devanados del transformador, realizando un barrido en el eje x y también sobre el eje z en uno de los devanados. La separación entre posiciones adyacentes de la fuente de EA para ambos barridos, en eje x y en z , es de 5 cm. La longitud recorrida por la fuente de EA durante el barrido en el eje x es de 80 cm, mientras que para el barrido en el eje z fue de 25 cm. En la Fig. 5.10 se muestra un ejemplo de las señales típicas de EA que se detectaron durante el experimento. Se puede comprobar en esa misma figura la capacidad del sistema para la medición simultánea de EA con múltiples sensores de FO.

Paralelamente con el desarrollo de esta tesis doctoral se realizaron otros trabajos de investigación relacionados con diseño e implementación de un IV en LabVIEW para la localización de fuentes de EA [5.4]. En este, los eventos de EA son detectados utilizando un umbral de amplitud en las señales de cada canal. El algoritmo de localización implementado en este IV, a diferencia de otros que están basados en la resolución de un sistema de ecuaciones construidas a partir de los TOA [5.5], está basado en una tabla de búsqueda (LUT) previamente definida por el algoritmo en la cual se encuentran los respectivos TOA asociados a las posiciones de cada sensor con respecto a las diferentes posiciones que pueden ocupar las fuentes de EA dentro del tanque. Utilizando este método se evitan los problemas de convergencia asociados a los métodos numéricos para la resolución de sistemas de ecuaciones.

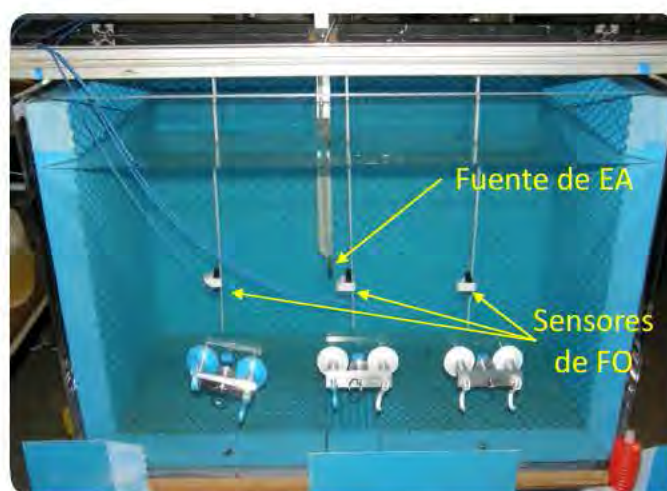


Figura 5.9. Fotografía de la plataforma de ensayos en la que se observan la matriz de sensores utilizada durante las medidas.

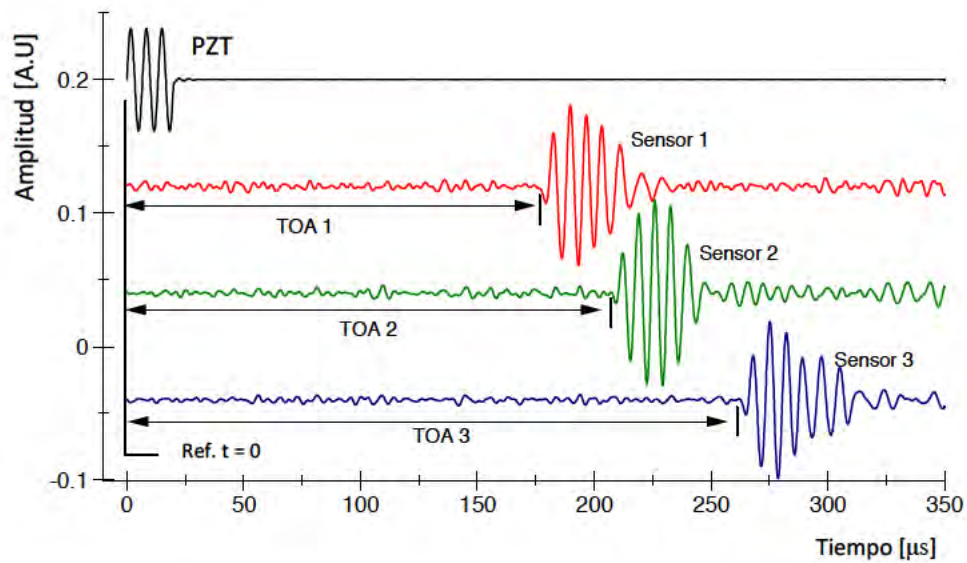


Figura 5.10. Señales acústicas detectadas con el sistema multicanal durante la medición simultánea utilizando tres sensores de FO.

La integración de ambos, el sistema optoelectrónico multicanal con sensores internos de FO y la instrumentación virtual para la localización de fuentes de EA, conforman un sistema de instrumentación para la monitorización de transformadores que cuenta con capacidad de localización de fallos en el sistema de aislamiento. El esquema simplificado del IV implementado para la localización de fuentes de EA es el que se observa en la Fig. 5.11

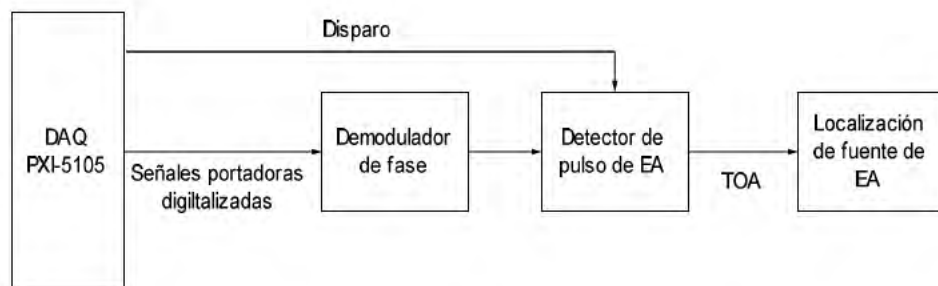


Figura 5.11. Esquema simplificado del IV utilizado para la localización de fuentes de EA.

Como se puede observar en el diagrama de la figura anterior, el IV es la integración del demodulador I/Q digital, un detector de pulso de EA y un algoritmo de localización. En este IV una vez que la señal portadora es digitalizada y demodulada, se obtienen señales como las mostradas anteriormente en la Fig. 5.10. Estas señales son procesadas por un detector de pulso que utiliza un umbral de amplitud para detectar la presencia de una EA en la señal (detección por flanco). Una vez que la amplitud de la EA supera el

nivel de umbral, se obtiene el TOA calculando la diferencia de tiempo entre una señal de referencia y el instante en que la EA supera el nivel de umbral. En la aplicación real, la señal de referencia puede ser tomada p. ej. de un sensor eléctrico para la monitorización de DP, a fin de conformar un sistema de localización de fuentes de EA con referencia eléctrica; o también puede emplearse una señal tomada de otro sensor acústico adicional que puede ser interno o externo, a fin de configurar un sistema completamente acústico [5.6]. Finalmente, los TOA de cada canal son utilizados por el algoritmo de localización que, como se mencionó anteriormente, utiliza una LUT para encontrar la posición de la fuente de EA.

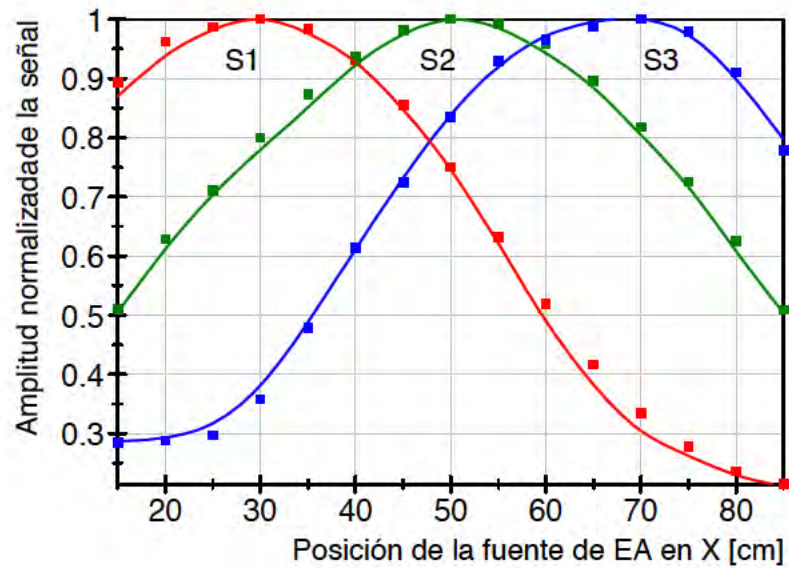
5.3.2 Resultados experimentales de localización de fuentes de emisiones acústicas

Antes de localizar la posición de la fuente, se obtuvieron resultados parciales de las etapas previas a la localización, como lo son la amplitud de las señales detectadas y la medida de los TOA. En las Fig. 5.12*a* y 5.12*b* se muestra un gráfico de las amplitudes normalizadas las señales de EA detectadas en cada sensor en función de la posición de la fuente de EA para los barridos en el eje x y en z respectivamente.

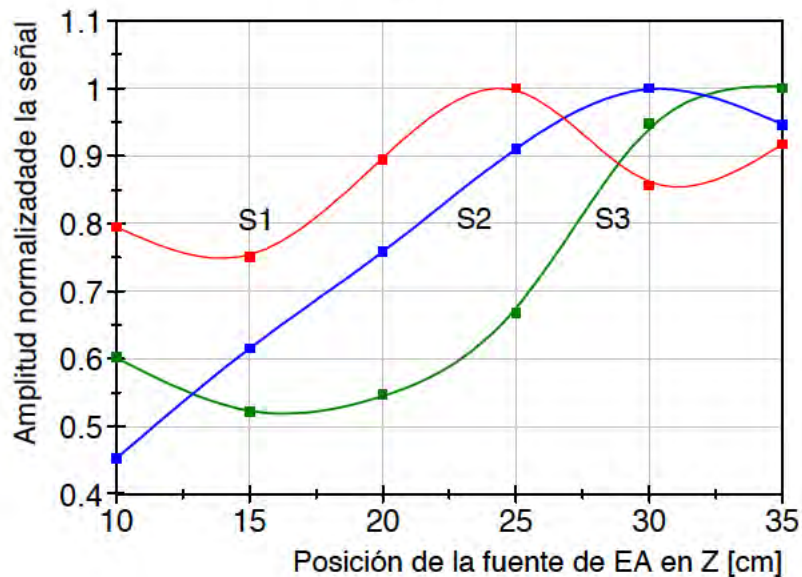
Los resultados de las medidas realizadas en el barrido en x (Fig. 5.12*a*) se encontró que hay zonas en las que, en uno de los sensores, la amplitud de las señales se ve reducida por debajo del 50% en comparación con el máximo posible. Esto indica que estas serían zonas en las que las EA son recibidas con una S/R más baja y por tanto la localización podría tener un peor comportamiento. Estas zonas están ubicadas en los extremos del barrido.

En el otro caso, para el barrido en z (Fig. 5.12*b*), no se observó una variación tan significativa en la amplitud de las señales. Sin embargo, la señal detectada por el sensor que se encuentra más alejado de la fuente, que en este caso es S1, se observó un nivel más bajo de señal en comparación con los otros dos sensores. Esta situación puede ser un caso típico de la detección con sensores internos en un entorno real dentro de un transformador en el que, dentro de ciertas zonas, solo sea posible detectar las EA con dos sensores. Una alternativa para esta situación es la localización en 2-D, ya que esta es posible utilizando dos sensores acústicos y un sensor eléctrico de DP adicional. De esta

forma se podría llegar a conocer el devanado en el que se está produciendo el fallo o una proyección en 2D de la zona en la cual se produce.



(a)

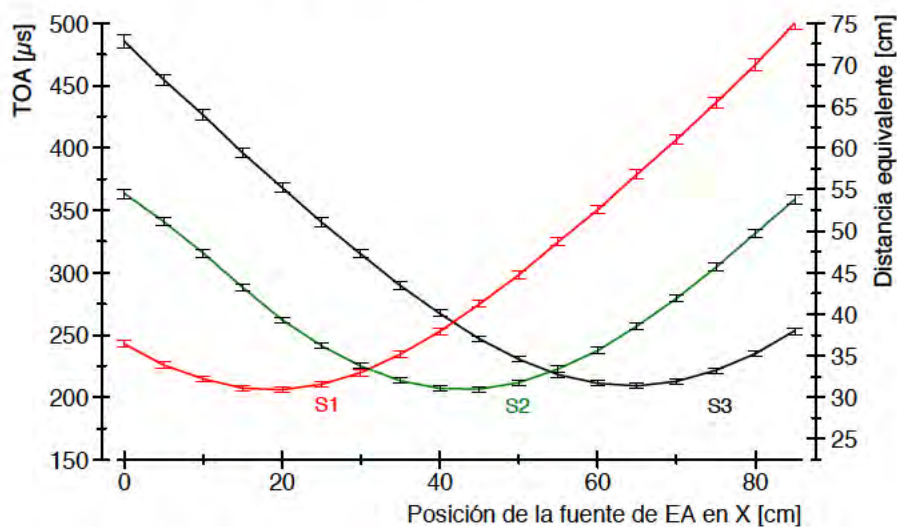


(b)

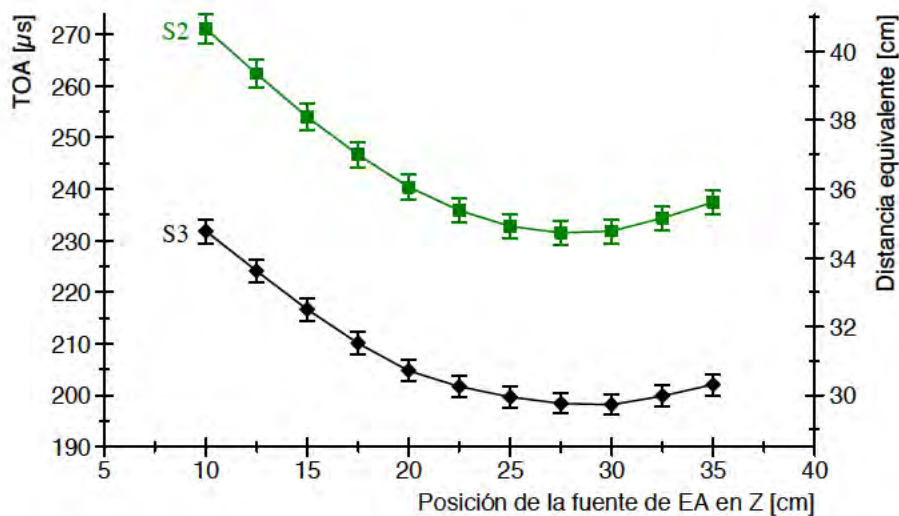
Figura 5.12. Amplitud normalizada de las EA detectadas para el barrido en el eje x (a) y en z (b).

Por otra parte, se obtuvo la medida de los TOA asociados a la posición de la fuente para cada uno de los sensores en ambos casos, barriendo en el eje x y en z . Estos se pueden observar en la Fig. 5.13a y 5.13b respectivamente. Las medidas de TOA para el barrido en el eje z se realizaron solo con los dos sensores en los cuales se observó mejor S/R, que fueron S2 y S3.

En las medidas de los TOA se encontró que la desviación máxima para ambos casos, barrido en x y z , fue de 1 cm. Este resultado muestra que la resolución del sistema en la medida de TOA es de 1 cm, lo cual corresponde a $\sim 1\%$ de la dimensión normalizada del tanque en el que se realizaron las medidas.



(a)



(b)

Figura 5.13. TOA de las EA encontrados para el barrido en el eje x (a) y en z (b).

Por otra parte, con el fin de evaluar el error en la localización de fuentes de EA, se añadió ruido a las medidas de TOA de cada canal mostradas en la Fig. 5.13a. El ruido introducido en las medidas tiene una distribución uniforme y una amplitud de $30 \mu s_{pp}$, lo cual, teniendo en cuenta la velocidad propagación de las EA en agua ($1.49 \text{ mm}/\mu s @ 25$

°C), equivale a una desviación de ± 2 cm (3% de la dimensión normalizada del tanque). Los resultados de las posiciones encontradas por el sistema de instrumentación se muestran en el gráfico 3-D de la Fig. 5.14.

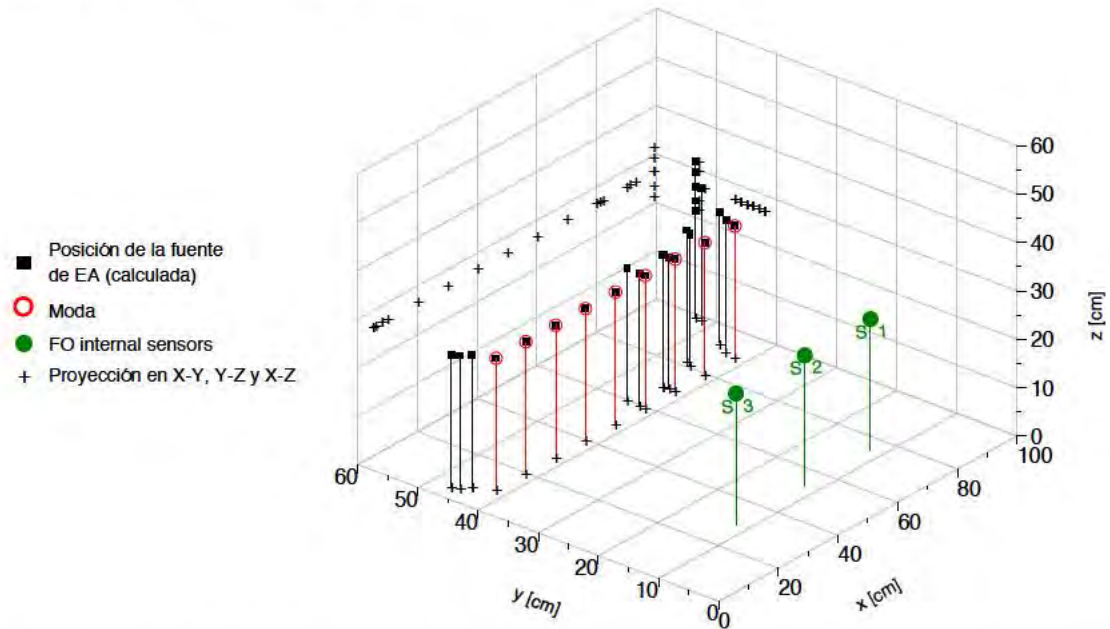


Figura 5.14. Resultado de la localización de las fuentes de EA para el barrido en el eje x.

Los resultados de la Fig. 5.14 muestran que hay una dispersión de las posiciones calculadas que es mayor en las zonas cercanas a los extremos del barrido. Este comportamiento se puede observar con más detalle en las Fig. 5.15a y 5.15b, en donde se muestra una proyección de las posiciones de la fuente de EA sobre los planos x - y y x - z , junto con algunas características estadísticas de los resultados obtenidos.

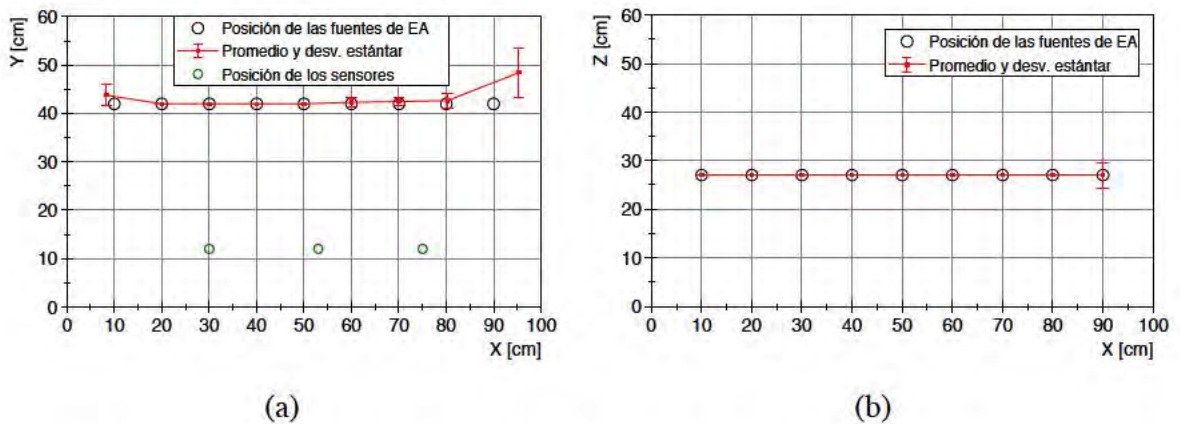


Figura 5.15. Proyecciones de las posiciones de la fuente de EA encontradas por el sistema de instrumentación: (a) en el plano x - y y (b) en x - z .

La dispersión en la localización de las fuentes de EA se produce por la degradación de la S/R conforme se incrementa la distancia entre la fuente de emisión y el sensor colocado en el extremo opuesto del barrido. Además de la atenuación de la EA por causa de la propagación, ésta también sufre los efectos del ángulo de incidencia con relación a ese sensor. Sin embargo, incluso bajo la influencia de estos efectos la resolución obtenida es de 1 cm en cada uno de los ejes, lo cual es $\sim 1\%$ de la dimensión normalizada del tanque.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

En esta tesis se presenta la investigación acerca de un nuevo sistema de instrumentación optoelectrónico capaz de detectar la proyección sobre varios puntos (multipunto/multicanal) de las EA generadas por DP en transformadores con aislamiento en aceite. La investigación se enfoca en un nuevo sensor de FO interferométrico diseñado para la instalación en el interior del tanque del transformador (sensor interno) y en un nuevo interferómetro heterodino multicanal de fibra óptica para la monitorización acústica de DP y la localización de fuentes de EA. En este capítulo se resumen los logros más importantes y las conclusiones obtenidas durante la investigación.

Se realizó un estudio exhaustivo del estado del arte de los sensores internos de FO y de los sistemas multiplexados para la medida acústica de DP. Como resultado del mismo, se propuso un sistema interferométrico multicanal para la detección multipunto de EA a 150 kHz con sensores de FO, aplicado a la monitorización de DP. En este estudio se incluye una revisión actualizada tanto de los sensores como de los sistemas, incluso de

aquellos que fueron desarrollados en paralelo con esta investigación y que fueron reportados posteriormente a los aquí propuestos.

Se desarrolló un sensor de FO interferométrico de alta sensibilidad para la medida acústica de DP generadas en aceite de transformador. Esta sonda de FO fue diseñada para la detección de EA de ultrasonido a 150 kHz. Se muestra el diseño desde su concepción como un tramo de FO hasta su implementación como una cabeza sensible compacta, robusta y de bajo coste. Las prestaciones de este nuevo sensor son superiores comparadas con las de cualquier otro sensor interno de FO o sensor PZT externo diseñado para la aplicación, tal y como fue demostrado en la caracterización exhaustiva realizada a la sonda.

Se presentan los experimentos realizados en entornos de alta tensión para la generación controlada de DP en aceite de transformador. En estos, se demostró por primera vez la detección acústica de DP de tipo internas con un sensor de FO. La detección de otros tipos de DP, tales como las DP superficiales y las generadas en entornos con HVDC, también fueron demostradas en esos experimentos con resultados satisfactorios.

El sistema de instrumentación multicanal para la detección acústica de DP con sensores internos de FO fue diseñado con base en un interferómetro Mach-Zehnder heterodino de fibra óptica, en el que se utiliza una configuración con múltiples brazos de medida en paralelo y un brazo de referencia común. La fuente de luz utilizada para iluminar el interferómetro es un láser de estado sólido de bajo coste que proporciona una longitud de onda corta. Este láser suministra la potencia óptica necesaria en los cuatro canales del interferómetro manteniendo las características requeridas para obtener un sistema de altas prestaciones. En la implementación del sistema se logró una resolución de 1 Pa en la medida de presión acústica de ultrasonidos a 150 kHz. Esta es la mejor resolución conseguida por un sistema multicanal en la aplicación de detección acústica de DP. Asimismo, el rango de medida de este instrumento es mayor a 10 kPa ($\text{Rango/Resolución} > 10^4$), gracias a la detección heterodina y a la demodulación digital de fase.

Se demostró experimentalmente la capacidad del sistema de instrumentación multicanal para la detección multipunto de EA y la localización de fuentes de EA. Además, se propuso una configuración específica para la colocación de los sensores dentro del tanque de un transformador. Esta fue probada con EA de ultrasonido que emulan a las generadas por las DP. En los experimentos de localización, se introdujo ruido sintético a las medidas de los TOA con el fin de demostrar la robustez del sistema. Los resultados de dichas pruebas mostraron que el sistema es capaz de localizar fuentes de EA con una precisión de 1 cm en cada eje.

Existe una gran variedad de sensores de FO interferométricos que han sido diseñados para otras aplicaciones y que son compatibles con el sistema interferométrico multicanal aquí propuesto; por lo tanto, éste se puede extender a otros campos de aplicación. En la sección dedicada al trabajo futuro se proponen nuevas aplicaciones para el sistema, tales como el esquema de FO de 4-canales para la medida de vibraciones sin contacto en experimentos de impacto a hipervelocidad (*Light Gas Gun* de la Universidad de Kent), el cual, fue desarrollado e instalado durante la estancia citada en la introducción y se encuentra pendiente de publicación.

A continuación se resumen las contribuciones más importantes de esta investigación:

1) El diseño de una sonda de FO optimizada para la detección de EA a 150 kHz

Se demostró que la sonda de FO desarrollada es la más adecuada para la detección acústica de DP. Mientras otros sensores como los basados en cavidades Fabry-Perot o en FBG son menos sensibles y más complejos de fabricar y de interrogar, el sensor interferométrico de FO desarrollado es de bajo coste, de alta sensibilidad y tiene un diseño compacto. Otras propuestas basadas también en bobinas de FO presentan una respuesta en frecuencia limitada (15 kHz – 40 kHz), mientras que la sonda propuesta está optimizada para la detección de DP a 150 kHz (respuesta plana entre 100 kHz – 300 kHz). Este sensor está inspirado en algunas de las características de los sensores PZT externos, pero tiene mejores prestaciones y está diseñado para su instalación en el interior de un transformador

2) Demostración de la sonda de FO en diversos entornos de alta tensión con diferentes tipos de DP

Las de DP tipo corona producen una señal de EA intensa. La medida acústica de este tipo de DP con sensores de FO ha sido reportada anteriormente también por otros autores. Sin embargo, demostrar la generación de diferentes tipos de DP en aceite de transformador y la detección acústica de las mismas, representó un reto en sí mismo. La sonda de FO fue probada con éxito en entornos de alta tensión en AC, con DP internas, con DP superficiales y también en entornos de alta tensión en DC. Estos últimos son un tema de investigación con gran interés en los sistemas eléctricos y en los sistemas de aislamiento eléctrico. Por lo tanto, se demostró la capacidad del sensor de FO para detectar DP en un amplio rango de condiciones. Merece la pena destacar que se demostró por primera vez la detección acústica de DP internas con un sensor de FO y que los experimentos de detección acústica de DP en entornos de alta tensión en DC están a la vanguardia en este campo de investigación.

3) El diseño y desarrollo de un esquema multicanal práctico que mantiene la resolución obtenida con un esquema de un solo canal y que, además, tiene un rango de medida más amplio

Aunque existían sensores acústicos de DP propuestos en la literatura, los sistemas multicanal han sido propuestos sólo recientemente debido a que se ha venido concentrando un gran esfuerzo en la optimización del sensor y el sistema de lectura con el fin de mejorar la sensibilidad a las frecuencias de ultrasonido, a expensas de una complejidad que es poco compatible con la medición multipunto. Con el sistema propuesto basado en interferometría heterodina se ha conseguido la mejor resolución reportada hasta el momento con un sistema para la detección acústica de DP. Además, este sistema representa una solución rentable comparada con otros sistemas propuestos recientemente para la detección multipunto de DP.

6.2 Trabajo futuro

Hacia aplicaciones con mayor densidad de canales

El sistema interferométrico propuesto puede expandirse a una implementación de hasta 8 canales utilizando exactamente el mismo esquema de FO y el sistema de adquisición. Debido a los requerimientos necesarios para la monitorización acústica de DP (rango, resolución y ancho de banda) con los que cumple este sistema, éste puede utilizarse en otras aplicaciones con mayor densidad de canales. No obstante, para mantener las mismas características, cualquier expansión debe tener al menos la misma potencia óptica por canal. Para ello, se pueden obtener algunas mejoras en el balance de potencia optimizando el esquema, p. ej. utilizando un AOM con puertos acoplados a fibra. Las pérdidas de potencia óptica en el esquema se producen principalmente por los dispositivos de espacio libre que se encuentran disponibles para el desplazamiento de la frecuencia óptica a longitudes de onda cortas. A cambio, con los dispositivos láser DPSS se puede incrementar la potencia óptica sin perder las características de coherencia y ruido de fase.

Por otra parte, una etapa adicional de control automático de ganancia en la cadena de acondicionamiento de la portadora de RF puede ayudar a compensar la diferencia en la relación señal a ruido entre los canales. En ese caso, los niveles de la señal portadora se pueden monitorizar y ecualizar con el fin de obtener la misma resolución en todos los canales.

Investigación sobre envejecimiento y tiempo de vida de los sensores de FO en sistemas de aislamiento papel-aceite

Los transformadores de potencia están diseñados para su funcionamiento durante un tiempo de vida prolongado, que puede ser mayor a 35 años con el mantenimiento adecuado. Por lo tanto, con el fin de garantizar la operación fiable durante la instalación a largo plazo de los nuevos sensores internos de FO, es necesario realizar una estimación del tiempo de vida de los mismos dentro de un entorno sumergido en aceite y bajo la influencia del estrés térmico.

En el campo de investigación de la ingeniería eléctrica y de los materiales aislantes, desde hace años se vienen desarrollando experimentos de envejecimiento acelerado de aislamientos con papel-aceite. El objetivo de los mismos es estudiar la degradación y estimar el tiempo de vida del sistema de aislamiento [6.1]–[6.5]. En estos experimentos, se preparan muestras de aceite junto con papel y otros materiales utilizados dentro del transformador, tales como cobre, etc., y se someten luego a estrés térmico y humedad, entre otros, con el fin de acelerar los efectos de envejecimiento en las muestras. Para el estudio y la estimación del tiempo de vida de los sensores de FO en entornos con aceite de transformador, se proponen experimentos similares a los mencionados anteriormente pero incluyendo sensores de FO en las diferentes muestras de aceite/papel. Durante los experimentos se puede monitorizar periódicamente el comportamiento de la FO en cuanto a transmisión, pérdidas ópticas y sensibilidad acústica, entre otras características, con el fin de evaluar los efectos del envejecimiento en el sensor.

Extender a otras aplicaciones el interferómetro heterodino de fibra óptica multicanal

Otro trabajo futuro estará orientado hacia nuevas aplicaciones del sistema interferométrico de FO. El sistema de instrumentación multicanal tiene el potencial para medir otras magnitudes físicas, en especial magnitudes dinámicas rápidas debido a que ha sido diseñado para la medida de ultrasonidos. Además, el sistema es compatible con otras sondas de medida que bien pueden ser de FO o también sin contacto. En este sentido, otra de las aplicaciones del sistema es la medida de vibraciones y la monitorización en ensayos de impacto en aerestructuras [6.6].

Con base en el mismo interferómetro multicanal heterodino se puede implementar un vibrómetro láser (VL) para medidas sin contacto realizando pocos cambios en el sistema, tal y como se puede observar en el esquema propuesto de la Fig. 6.1.

En el esquema de la Fig. 6.1, los brazos de medida del sistema original (Fig. 4.3) se remplazan por un conjunto de colimadores y circuladores, de tal forma que se obtiene un interferómetro Mach-Zehnder doblado. Las sondas sin contacto se componen de un cable de FO y un colimador. El haz de luz se proyecta desde el colimador hasta el objetivo (superficie en vibración) donde es reflejado de vuelta hacia el circulador y luego se combina con la luz del brazo de referencia en un acoplador de 3dB.

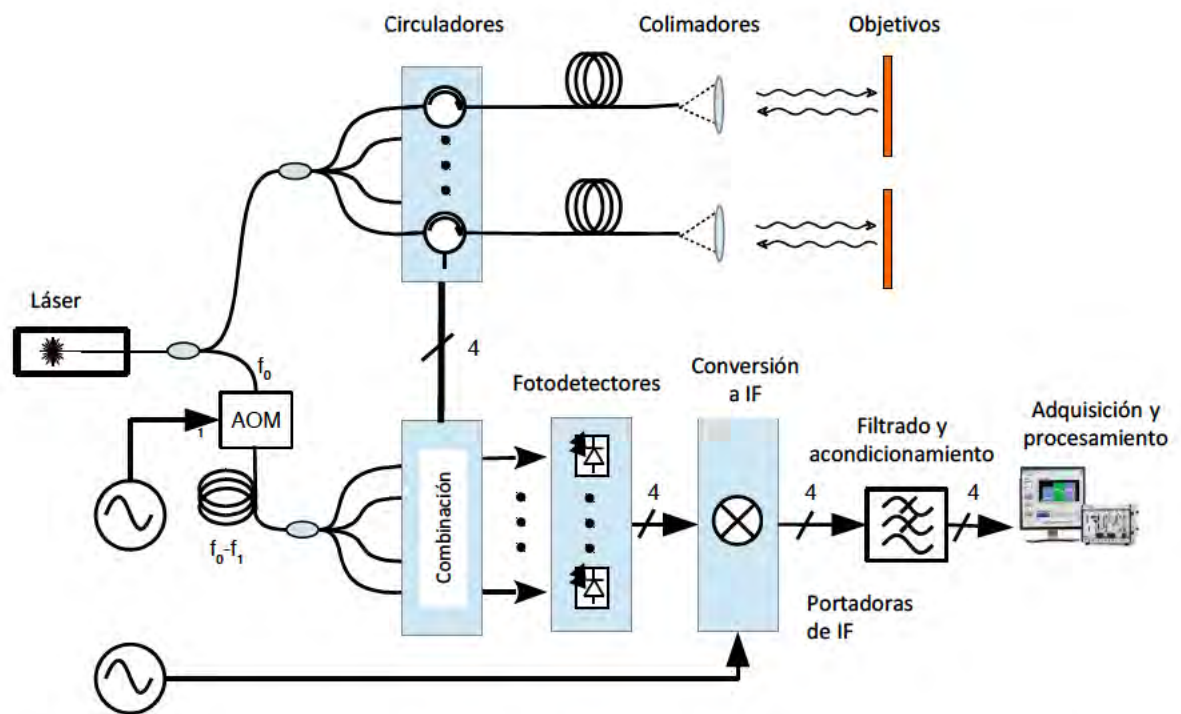


Figura 6.1. Esquema propuesto de un vibrómetro láser para medidas sin contacto en múltiples puntos basado en el sistema de instrumentación multicanal con interferómetro heterodino.

El esquema propuesto presenta ventajas sobre los vibrómetros láser convencionales debido a que se puede obtener una medida de alta resolución en múltiples puntos de forma simultánea. Esta característica puede ser útil en muchas aplicaciones como p. ej. en ensayos de impacto y vibraciones sobre estructuras de gran tamaño, como puede ser el caso en las industrias automovilística y aeroespacial. Basado en esta propuesta se ha desarrollado un VL de cuatro canales para la medida sin contacto de impactos en materiales compuestos. Esta investigación ha sido llevada a cabo en colaboración con el Grupo de Óptica Aplicada de la Universidad de Kent, durante una estancia del autor por un periodo de 3 meses bajo la supervisión del Prof. David A. Jackson. Tanto el sistema como los resultados de los experimentos realizados en un cañón de gas ligero, están pendientes de publicación.

Aplicar el interferómetro heterodino multicanal a la medida con sensores FBG

Los sensores FBG resultan interesantes debido a su tamaño reducido y a su capacidad de multiplexación. Con ellos se puede obtener un amplio rango de medida pero rara vez se consigue una alta resolución sin un sistema de interrogación interferométrico.

La medida de señales de ultrasonido de baja amplitud, tales como las EA producidas por las DP, necesitan de un sistema de interrogación con una resolución muy alta. Con el fin de medir EA de baja amplitud, se propone un sistema multicanal que está diseñado para la interrogación de sensores FBG multiplexados en serie y en una configuración con RL [6.7]. El esquema del sistema propuesto es el que se muestra en la Fig. 6.2.

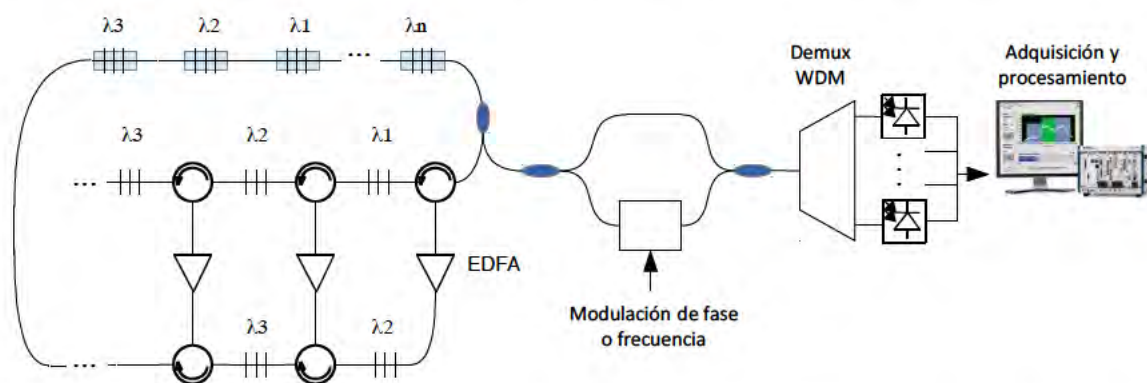


Figura 6.2. Esquema propuesto de un sistema interferométrico para la medida en alta resolución de EA de ultrasonido con sensores FBG multiplexados.

El esquema utiliza *phase-shifted chirped* FBG multiplexadas en serie en una sonda de FO. Estas se encuentran funcionando en transmisión y pueden colocarse de forma solidaria a un carrito cilíndrico con el fin de incrementar la sensibilidad.

El esquema propuesto realiza una interrogación interferométrica de los sensores FBG en la que se utiliza una aproximación con portadora, con lo cual, se elimina la necesidad de los lazos de realimentación que se utilizan en otros esquemas [6.8] y además se incrementa el rango de medida. El modulador colocado en uno de los brazos de interferómetro puede ser un AOM si se desea una aproximación heterodina, pero también se puede utilizar un modulador de fase con el fin de implementar otras aproximaciones como p. ej. la pseudo-heterodina [6.9] o la de portadora generada con modulación de fase [6.10].

El sistema propuesto ofrece las ventajas de los sensores FBG, como lo son la gran densidad de multiplexación en una sola sonda y un amplio rango de medida, junto con la alta resolución que proporciona la interrogación interferométrica.

Conclusions

This dissertation presents the research on a new optoelectronic instrumentation system able to detect the projection on several points (multi-point / multi-channel) of the AE from PD in oil-paper insulated transformers. It is focused on a new fiber-optic interferometric sensor being installed inside transformers (internal sensor) and a new fiber-optic multichannel heterodyne interferometer for the acoustic monitoring of PD and the localization of the AE sources. This chapter summarizes the major achievements and conclusions during the research.

A comprehensive study of the state of the art of internal FO sensors and multiplexing systems for the acoustic measurement of PD was carried out. As a result, a new multi-channel interferometer for the multi-point detection of AE at 150 kHz with FO interferometric sensors is proposed for the application of PD monitoring. Upgraded sensors and systems are included, even though they were developed in parallel with this research and reported later than the proposal.

A FO interferometric sensor of high-sensitivity was developed for the acoustic measurement of PD in transformer oil. This FO probe was designed for the detection of ultrasound AE at 150 kHz. The design from a length of optical fiber to a compact, rugged and cost-effective sensing head was presented. The characteristics of the new probe are superior compared with any other type of internal FO sensor or compared with external PZT sensors, as it was demonstrated in the exhaustive characterization of the probe.

The experiments performed in a High Voltage setup for the controlled generation of different types of PD in transformer oil are reported. The acoustic detection with a FO sensor of PD of internal type was demonstrated for the first time. The detection of other types of PD such as surface PD and those generated in HVDC setups was also tested successfully. These results demonstrated that this FO probe is the most suitable for the

application of acoustic detection of PD compared with other reported internal sensors since its publication and to date.

The multichannel instrumentation system for the acoustic detection of PD with internal FO sensors was designed on the base of a fiber-optic Mach-Zehnder heterodyne interferometer with multiple sensing arms in parallel and a common reference arm. A low-cost short wavelength solid-state laser was used to illuminate the system. This laser is able to provide optical power to the 4-channels interferometer, but maintains the characteristics required to obtain a high performance system. A resolution of 1 Pa in the measurement of ultrasound acoustic pressure was achieved at each channel with this implementation. This is the best resolution achieved with a multichannel system for the application of acoustic detection of PD. In addition, the measurement range is more than 10 kPa (Range / Resolution $> 10^4$), thanks to the heterodyne approach and the digital demodulation.

The capability of the multichannel instrumentation system for the multipoint detection of AE and the localization of AE sources have been demonstrated experimentally. A specific configuration for locating the FO sensors within the transformer tank was also proposed and tested with ultrasound AE that reproduce the AE from PD. In the localization experiments, synthetic noise was introduced in the TOA measurements in order to demonstrate the robustness of the system. The results of these tests showed that this system is able to localize AE sources with a precision in each axis better than 1 cm.

There are a variety of FO interferometric sensors that have been designed for other purposes along the years, which are compatible with the multichannel interferometric system; therefore, the application of the multichannel system developed here can be extended to other fields. In the section devoted to the future work, new applications for this system are proposed, such as the 4-channels FO scheme for non-contact heterodyne detection of vibrations in experiments of impacts with low size particle in regimes of hypervelocity (Light Gas Gun at Kent University), which was developed and installed during a stay cited in the introduction and pending of publication.

The main contributions of this research work are summarized as follows:

1) The design of a FO probe optimized for the detection of AE at 150 kHz

It has been demonstrated that it is the most suitable FO probe for the acoustic detection of PD. Whereas other sensors based on Fabry Perot cavities and FBG are less sensitive and more complex because of the processes of fabrication or the systems that are necessary to interrogate them, the proposed FO interferometric sensor is a cost-effective, but high-sensitive and compact design. Other attempts based on a FO coil are limited by their frequency response (15 kHz – 40 kHz), which in the proposed FO sensor was optimized for PD detection at 150 kHz (flat frequency response 100 kHz – 300 kHz). It was inspired on the characteristics of PZT sensors, but has better features than PZT sensors and is installed within power transformers.

2) The demonstration of the fiber-optic sensing probe in a variety of high voltage setups and with different types of PD

Acoustic measurements of corona PD, which produce intense bursts of AE, have been reported by other authors. However, it was a challenge to demonstrate the generation of PD of different types in transformer oil and the detection of these PD. The fiber-optic sensing probe was successfully tested in high voltage AC setups, with internal partial discharges, with surface partial discharges, and also in high voltage DC setups that are a main topic of research in electrical systems and isolation systems. Therefore, the capacity of the sensor to detect PD under a wide range of conditions was also demonstrated. It is worth mentioning that the acoustic detection of internal partial discharges with a fiber-optic sensor was demonstrated for the first time and the measurements in HVDC setups are state-of-the-art experiments in this research field.

3) The design and development of a multi-channel practical scheme that maintains the resolution that was achieved with a system of one channel and, in addition, extends the range one order of magnitude

Even though there were sensors of AE from PD proposed in the literature, the multiplexing systems have been proposed only recently because the main efforts were

focused on optimizing the sensor and interrogation system in terms of the sensitivity to the ultrasound frequencies at the expense of a complexity that is not compatible with multi-point measurements. The best resolution in the measurement of ultrasound acoustic pressure (in conditions of PD detection) was achieved with the proposed multichannel system based on a heterodyne interferometer. Moreover, it is also a cost-effective solution compared with others systems proposed recently for multipoint acoustic detection of PD.

Lista de publicaciones

Cuerpo de la tesis

Artículos publicados en revistas

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems,” *Sensors* (Basel), vol. 12, no. 4, pp. 4793–802, Jan. 2012.

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in power transformers,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 9, p. 094015, Sep. 2013.

Volúmenes SPIE / OFS

J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano, and J. A. Garcia-Souto, “All-fiber interferometric sensor of 150kHz acoustic emission for the detection of partial discharges within power transformers,” in *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2011, Proc. of SPIE, vol. 7753, p.p 77531S–77531S–4.

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Multichannel fiber optic heterodyne interferometer for the acoustic detection of partial discharges,” in *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2012, Proc. SPIE, vol. 8421, p.p. 84211O–84211O–4.

I. Búa-núñez, C. G. Azcárraga-ramos, **J. E. Posada-Roman**, and J. A. Garcia-souto, “Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments,” in *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2014, Proc. of SPIE, vol. 9157, p.p. 91572G–91572G–4.

Comunicaciones a congresos IEEE

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Intrinsic fiber optic ultrasound sensor for oil immersed detection of partial discharges,” in *IEEE SENSORS*, 2011, pp. 386–389.

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, J. Rubio-Serrano, and I. Búa-núñez, “Multichannel Ultrasound Instrumentation for On-line Monitoring of Power Transformers with Internal Fiber Optic Sensors,” in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2013, p.p. 200–205.

Otros relacionados con la tesis

Relacionados con los sistemas interferométricos

D. A. Jackson, **J. E. Posada-Roman** and J. A. Garcia-Souto, “Calibration of a laser Doppler vibrometer exploiting Bessel functions of the first kind,” *Electronics Letters*, vol. 57, no. 14, pp. 1100 – 1102, Jul. 2015.

D. A. Jackson, **J. E. Posada-Roman**, and J. A. Garcia-Souto, “New topologies for fiber laser non-contact vibrometers,” in *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, 2014, pp. 1531–1534.

Relacionados con la aplicación de emisiones acústicas / descargas parciales

J. Rubio-Serrano, M. Rojas-Moreno, **J. E. Posada-Roman**, J. M. Martínez-Tarifa, G. Robles, and J. A. Garcia-Souto, “Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 5, pp. 1569–1578, Oct. 2012.

C. Boya, M. Ruiz-Llata, **J. E. Posada-Roman**, and J. A. Garcia-Souto, “Identification of multiple partial discharge sources using acoustic emission technique and blind source separation,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 3, pp. 1663–1673, Jun., 2015.

I. Bua-Nunez, **J. E. Posada-Roman**, J. Rubio-Serrano, and J. A. Garcia-Souto, “Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 5, pp. 1002–1013, Nov. 2014.

Glosario

AOM	<i>Modulador acusto-óptico (Acousto-optic Modulator)</i>
CFBG	<i>Chirped Fiber Bragg Grating</i>
CWDM	<i>Multiplexación por División en Longitudes de Onda Ligeras (Coarse wavelength Division Multiplexing)</i>
DGA	<i>Análisis de Gases Disueltos en Aceite (Dissolved Gas Analysis)</i>
DP	<i>Descargas Parciales</i>
DPSS	<i>Láser de estado sólido (Diode-Pumped Solid-State Laser)</i>
EA	<i>Emisión Acústica</i>
EDFA	<i>Amplificador Óptico de Fibra Dopado con Erblio (Erbium Doped Fiber Amplifier)</i>
FBG	<i>Redes de Bragg en Fibra Óptica (Fiber Bragg Grating)</i>
FDM	<i>Multiplexación por División en Frecuencia (Frequency Division Multiplexing)</i>
FO	<i>Fibra Óptica</i>
FP	<i>Fabry-Perot</i>
HF	<i>Alta Frecuencia (High Frequency)</i>
HFCT	<i>Transformador de Corriente de Alta Frecuencia (High Frequency Current Transformer)</i>
HVAC	<i>Alta Tensión en Corriente Alterna (High Voltage Alternating Current)</i>
HVDC	<i>Alta Tensión en Corriente Directa (High-Voltage Direct Current)</i>
IV	<i>Instrumento Virtual</i>
LUT	<i>Tabla de Búsqueda (Lookup Table)</i>
NR	<i>Sensibilidad Normalizada (Normalized Responsivity)</i>
PS-CFBG	<i>Phase-Shifted Chirped Fiber Bragg Grating</i>
PTFE	<i>Politetrafluoroetileno (Teflon)</i>
PZT	<i>Piezoeléctrico</i>
RL	<i>Láser de Anillo (Ring Laser)</i>
S/R	<i>Relación Señal a Ruido</i>
SLED	<i>Diodos emisores de luz superluminescentes (Superluminescent diode)</i>
TDM	<i>Multiplexación por División en Tiempo (Time Division Multiplexing)</i>
TOA	<i>Tiempo de Llegada (Time of Arrival)</i>
UHF	<i>Frecuencia Ultra Alta (Ultra High Frequency)</i>
VHF	<i>Frecuencia Muy Alta (Very High Frequency)</i>
WDM	<i>Multiplexación por División en Longitudes de Onda (Wavelength Division Multiplexing)</i>

Referencias

Capítulo 1

- [1.1] V. Akhmatov, M. Callavik, C. M. Franck, S. E. Rye, T. Ahndorf, M. K. Bucher, H. Muller, F. Schettler, and R. Wiget, “Technical guidelines and prestandardization work for first HVDC Grids,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 1, pp. 327–335, 2014.
- [1.2] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12–25, Nov. 2002.
- [1.3] T. K. Saha, “Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, no. 5, pp. 903–917, 2003.
- [1.4] Y. Wang, S. Gong, and S. Grzybowski, “Reliability Evaluation Method for Oil–Paper Insulation in Power Transformers,” *Energies*, vol. 4, no. 9, pp. 1362–1375, Sep. 2011.
- [1.5] H. K. and S. Karmakar, “Incipient fault diagnosis of power transformers using optical spectro-photometric technique,” in *International Conference on Optics and Photonics*, 2015, Proc. SPIE, vol. 9654, p. 96540R.
- [1.6] V. Cruz, A. Costa, and M. Paredes, “Development and evaluation of a new DGA diagnostic method based on thermodynamics fundamentals,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 888–894, 2015.
- [1.7] J. Wada, G. Ueta, S. Okabe, and T. Amimoto, “Method to evaluate the degradation condition of transformer insulating oil - establishment of the evaluation method and application to field transformer oil,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 1266–1274, 2015.
- [1.8] A. Cavallini, G. Montanari, M. Tozzi, and X. Chen, “Diagnostic of HVDC systems using partial discharges,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 1, pp. 275–284, 2011.

- [1.9] N. D. Jacob, W. M. McDermid, and B. Kordi, "On-line monitoring of partial discharges in a HVDC station environment," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 3, pp. 925–935, 2012.
- [1.10] T. Leibfried, "Online monitors keep transformers in service," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 11, no. 3, pp. 36–42, Jul. 1998.
- [1.11] S. Tenbohlen and F. Figel, "On-line condition monitoring of power transformers," in *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, 2000, vol. 3, pp. 2211–2216.
- [1.12] IEEE-PC57.143/D21, "Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components." 2010.
- [1.13] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 3, pp. 8–17, 2002.
- [1.14] IEEE Std C57.104-1991, "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers," 1992.
- [1.15] G. C. Stone, "Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 5, pp. 891–903, Oct. 2005.
- [1.16] R. Bartnikas, "Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, no. 5, pp. 763–808, Oct. 2002.
- [1.17] S. Tenbohlen, D. Denissov, S. M. Hoek, and S. M. Markalous, "Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, pp. 1544–1552, 2008.
- [1.18] M. Hikita, S. Ohtsuka, and S. Matsumoto, "Recent trend of the partial discharge measurement technique using the UHF electromagnetic wave detection method," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 2, no. 5, pp. 504–509, 2007.
- [1.19] S. Markalous, S. Tenbohlen, and K. Feser, "Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, pp. 1576–1583, Dec. 2008.
- [1.20] M. D. Judd, "Experience with UHF partial discharge detection and location in power transformers," in *Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2011, pp. 201–205.
- [1.21] M. D. Judd and I. B. B. Hunter, "Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: sensors and signal interpretation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 2, pp. 5–14, Mar. 2005.

- [1.22] M. D. Judd and I. B. B. Hunter, "Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors. Part 2: field experience," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 3, pp. 5–13, May 2005.
- [1.23] B. Yu, D. W. Kim, J. Deng, H. Xiao, and A. Wang, "Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers.," *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 16, pp. 324–3250, Jun. 2003.
- [1.24] X. Wang, B. Li, Z. Xiao, S. H. Lee, H. Roman, O. L. Russo, K. K. Chin, and K. R. Farmer, "An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 15, no. 3, pp. 521–527, Mar. 2005.
- [1.25] S. E. U. Lima, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. a. Ferreira, J. L. Santos, V. Miranda, and O. Frazão, "Fiber laser sensor based on a phase-shifted chirped grating for acoustic sensing of partial discharges," *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 1, pp. 44–51, Mar. 2012.
- [1.26] C. Macià-Sanahuja, H. Lamela, and J. A. García-Souto, "Fiber optic interferometric sensor for acoustic detection of partial discharges," *J. Opt. Technol.*, vol. 74, no. 2, pp. 122–126, Feb. 2007.
- [1.27] B. Dong, M. Han, and A. Wang, "Two-wavelength quadrature multipoint detection of partial discharge in power transformers using fiber Fabry-Perot acoustic sensors," in *Fiber Optic Sensors and Applications IX*, 2012, Proc. SPIE, vol. 8370, p. 83700K–83700K–11.

Capítulo 2

- [2.1] IEC-60270, “High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements.” 2002.
- [2.2] G. C. Stone, “Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 5, pp. 891–903, Oct. 2005.
- [2.3] K. C. Kao, “Electrical Aging, Discharge, and Breakdown Phenomena,” in *Dielectric Phenomena in Solids — With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes*, Academic Press, 2004, pp. 515–572.
- [2.4] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12–25, Nov. 2002.
- [2.5] R. Bartnikas, “Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, no. 5, pp. 763–808, Oct. 2002.
- [2.6] L. E. Lundgaard, “Partial Discharge-Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection -Fundamental Considerations,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 25–31, Jul. 1992.
- [2.7] R. T. Harrold, “Acoustical Techniques for Detecting and Locating Electrical Discharges,” in *Engineering Dielectrics Vol 1: Corona Measurement and Interpretation*, R. Bartnikas and E. J. McMahon, Eds. ASTM Special Technical Publication 669, 1979, pp. 358–408.
- [2.8] E. Howells and E. T. Norton, “Detection of Partial Discharge in Transformers Using Acoustic Emission Techniques,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 97, no. 5, pp. 1538–1549, 1978.
- [2.9] R. Harrold, “Ultrasonic Spectrum Signatures of Under-Oil Corona Sources,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-10, no. 4, pp. 109–112, Dec. 1975.
- [2.10] IEEE-Std-C57.127TM-2007, “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors,” vol. 2007, no. August. 2007.
- [2.11] E. Howells and E. Norton, “Parameters Affecting the Velocity of Sound in Transformer Oil,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, no. 5, pp. 1111–1115, May 1984.
- [2.12] D.-J. Kweon, S.-B. Chin, H.-R. Kwak, J.-C. Kim, and K.-B. Song, “The Analysis of Ultrasonic Signals by Partial Discharge and Noise From the Transformer,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 3, pp. 1976–1983, 2005.

- [2.13] P. M. Eleftherion, "Partial discharge. XXI. Acoustic emission based PD source location in transformers," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 11, no. 6, pp. 22–26, Nov. 1995.
- [2.14] R. Meunier and G. H. Vaillancourt, "Propagation behaviour of acoustic partial discharge signals in oil-filled transformers," in *ICDL '96. 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, 1996, pp. 401–404.
- [2.15] P. E. Vohl, Y. Gervais, and D. Mukhedkar, "Model Analysis of Ultrasonic Pulses Generated by Partial Discharges," in *IEEE/PES Summer Meeting*, 1975, pp. A76416–8.
- [2.16] M. M. Yaacob, M. a. Alsaedi, J. R. Rashed, a. M. Dakhil, and S. F. Atyah, "Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors," *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 4, pp. 325–337, 2014.
- [2.17] M. Born and E. Wolf, *Multiple-beam interference*, 7th ed. Cambridge, UK: Cambridge university press, 1999.
- [2.18] X. Wang, "An Optic Fiber Sensor for Partial Discharge Acoustic Detection," Ph.D. Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA, 2005.
- [2.19] J. Deng, "Development of Novel Optical Fiber Interferometric Sensors with High Sensitivity for Acoustic Emission Detection," Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2004.
- [2.20] X. Wang, B. Li, Z. Xiao, S. H. Lee, H. Roman, O. L. Russo, K. K. Chin, and K. R. Farmer, "An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 15, no. 3, pp. 521–527, Mar. 2005.
- [2.21] J. Chen, W. Li, H. Jiang, and Z. Li, "Stabilization of a fiber Fabry-Perot interferometric acoustic wave sensor," *Optik (Stuttg.)*, vol. 124, no. 4, pp. 339–342, 2013.
- [2.22] J. H. Zhao, Y. K. Shi, N. Shan, and X. Q. Yuan, "Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement," *Opt. Laser Technol.*, vol. 40, no. 6, pp. 874–880, 2008.
- [2.23] J. Chen, D. Chen, J. Geng, J. Li, H. Cai, and Z. Fang, "Stabilization of optical Fabry-Perot sensor by active feedback control of diode laser," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 148, no. 2, pp. 376–380, 2008.
- [2.24] B. Yu, D. W. Kim, J. Deng, H. Xiao, and A. Wang, "Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers," *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 16, pp. 324–3250, Jun. 2003.

- [2.25] S. E. U. Lima, O. Frazão, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, V. Miranda, and J. L. Santos, “Extrinsic and intrinsic fiber optic interferometric sensors for acoustic detection in high-voltage environments,” *Opt. Eng.*, vol. 48, no. 2, p. 024401, Feb. 2009.
- [2.26] S. E. U. Lima, O. Frazão, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and V. Miranda, “Mandrel-Based Fiber-Optic Sensors for Acoustic Detection of Partial Discharges—a Proof of Concept,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 2526–2534, Oct. 2010.
- [2.27] C. K. Kirkendall and A. Dandridge, “Overview of high performance fibre-optic sensing,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 197–216, 2004.
- [2.28] K. Wang, X. Tong, and X. Zhu, “Transformer partial discharge monitoring based on optical fiber sensing,” *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 2, pp. 137–141, 2014.
- [2.29] X. Wang, B. Li, H. T. Roman, O. L. Russo, K. Chin, and K. R. Farmer, “Acousto-optical PD Detection for Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 3, pp. 1068–1073, Jul. 2006.
- [2.30] J. Deng, H. Xiaob, W. Huoa, M. Luob, R. Maya, A. Wang, and Y. Liu, “Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 305–311, Jul. 2001.
- [2.31] S. S. Tsai, “Power Transformer Partial Discharge (PD) Acoustic Signal Detection using Fiber Sensors and Wavelet Analysis , Modeling , and Simulation by,” M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2002.
- [2.32] B. Dong, M. Han, L. Sun, J. Wang, Y. Wang, and A. Wang, “Sulfur Hexafluoride-Filled Extrinsic Fabry–Pérot Interferometric Fiber-Optic Sensors for Partial Discharge Detection in Transformers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, no. 18, pp. 1566–1568, 2008.
- [2.33] A. K. Lazarevich, “Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor by,” M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2003.
- [2.34] L. Song, “Detection and Position Location of Partial Discharges in Transformers Using Fiber Optic Sensors,” M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2004.
- [2.35] B. Yu, “Development of Tunable Optical Filters For Interrogation of White-Light Interferometric Sensors Development of Tunable Optical Filters For Interrogation of White-Light Interferometric Sensors,” Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2005.
- [2.36] B. Dong, M. Han, and A. Wang, “Two-wavelength quadrature multipoint detection of partial discharge in power transformers using fiber Fabry-Perot

- acoustic sensors,” in *Fiber Optic Sensors and Applications IX*, 2012, Proc. SPIE, vol. 8370, p. 83700K–83700K–11.
- [2.37] B. Culshaw, “Principles of Fiber Optic Sensors,” in *Guided Wave Optical Components and Devices*, 1st ed., B. P. Pal, Ed. Waltham, Massachusetts, United States: Academic Press, 2005, pp. 371–387.
- [2.38] G. B. Hocker, “Fiber-optic sensing of pressure and temperature,” *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 9, p. 1445, May 1979.
- [2.39] A. Dandridge, “Fiber optic Sensors Based on the Mach-Zehnder and Michelson Interferometers,” in *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 1st ed., E. Udd and W. B. Spillman, Eds. New York, United States: Wiley, 1991, pp. 271–323.
- [2.40] T. R. Blackburn, B. T. Phung, and R. E. James, “Optical Fibre Sensor for Partial Discharges Detection and Location in High-Voltage Power Transformer,” in *Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, 1992, pp. 33–36.
- [2.41] A. Zargari and T. R. Blackburn, “Modified optical fibre sensor for PD detection in high-voltage power equipment,” in *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1996, vol. 1, pp. 424–427.
- [2.42] H. Lamela-Rivera, C. Macia -Sanahuja, and J. a Garc a-Souto, “Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power transformers,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 5, no. 1, pp. 66–72, 2002.
- [2.43] C. Macià-Sanahuja, H. Lamela, and J. A. García-Souto, “Fiber optic interferometric sensor for acoustic detection of partial discharges,” *J. Opt. Technol.*, vol. 74, no. 2, pp. 122–126, Feb. 2007.
- [2.44] M. Macalpine, Z. Zhiqiang, and M. S. Demokan, “Development of a fibre-optic sensor for partial discharges in oil-filled power transformers,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 63, pp. 27–36, 2002.
- [2.45] P. Boffi, R. Bratovich, F. Persia, A. Barberis, and M. Martinelli, “1550nm All-Fiber Interferometer For Partial Discharge Detection In Oil-Insulated Power Transformer,” in *International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2006, p. TuC5 1–4.
- [2.46] D. A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge, and A. B. Tveten, “Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber,” *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 17, pp. 2926–2929, 1980.
- [2.47] J. A. Garcia-Souto, “Interferometría láser de fibra óptica para medida de temperatura y vibraciones: sensores aplicados en el interior de transformadores de potencia y embebidos en fibra de carbono para aplicaciones aeronáuticas,” Ph.D. Thesis, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2003.

- [2.48] J. A. Garcia-souto and H. Lamela Rivera, “Comparative analysis of optical-fibre Interferometric sensors versus acelerometers: application to vibrations inside high-power transformers,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 4, pp. 318–326, 2002.
- [2.49] H. Lamela Rivera, J. A. Garcia-souto, and J. Sanz, “Measurements of Mechanical Vibrations at Magnetic Cores of Power Transformers with Fiber-Optic Interferometric Intrinsic Sensor,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 5, pp. 788–797, 2000.
- [2.50] H. Lamela-Rivera, C. Macià, and J. A. Garcia-Souto, “Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power transformers,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 5, no. 1, pp. 66–72, Jan. 2003.
- [2.51] Z. Zhiqiang, M. Macalpine, and M. S. Demokan, “The Directionality of an Optical Fiber High-Frequency Acoustic Sensor for Partial Discharge Detection and Location,” *J. Light. Technol.*, vol. 18, no. 6, pp. 795–806, 2000.
- [2.52] S. Knudsen and K. Blotekjaer, “An ultrasonic fiber-optic hydrophone incorporating a push-pull transducer in a Sagnac interferometer,” *J. Light. Technol.*, vol. 12, no. 9, pp. 1696–1700, Sep. 1994.
- [2.53] J. Jarzynski, R. Hughes, T. R. Hickman, and J. A. Bucaro, “Frequency response of interferometric fiber-optic coil hydrophones,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 69, no. 6, pp. 1799–1808, 1981.
- [2.54] L. Wang, N. Fang, C. Wu, H. Qin, and Z. Huang, “A fiber optic PD sensor using a balanced Sagnac interferometer and an EDFA-based DOP tunable fiber ring laser,” *Sensors (Basel)*, vol. 14, no. 5, pp. 8398–422, Jan. 2014.
- [2.55] A. D. Kersey, “Distributed and multiplexed fiber optic sensors,” in *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 2nd ed., E. Udd and W. B. Spillman, Eds. New Jersey: Wiley, 2011, pp. 277–311.
- [2.56] A. D. Dandridge and A. D. Kersey, “Multiplexed Interferometric Fiber Sensor Arrays,” in *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors*, 1992, Proc. SPIE, vol. 1586, pp. 176–183.
- [2.57] J. A. García-Souto and H. Lamela Rivera, “Multichannel fiber-optic interferometric sensor for measurements of temperature and vibrations in composite materials,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 5, pp. 780–787, 2000.
- [2.58] M. J. Connelly, “Digital synthetic-heterodyne interferometric demodulation,” *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 4, no. 6, pp. S400–S405, Nov. 2002.
- [2.59] J. Bush and A. Cekorich, “Multichannel interferometric demodulator,” in *Third Pacific Northwest Fiber Optic Sensor Workshop*, Proc. SPIE, 1997, vol. 3180, pp. 1–11.

- [2.60] B. Griffin and M. J. Connelly, "Interferometric fiber optic sensor interrogation system using digital signal processing and synthetic-heterodyne detection," in *7th International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2005, Proc.SPIE, vol. 5855, pp. 619–622.
- [2.61] E. Zhang, B. Chen, L. Yan, T. Yang, Q. Hao, W. Dong, and C. Li, "Laser heterodyne interferometric signal processing method based on rising edge locking with high frequency clock signal.," *Opt. Express*, vol. 21, no. 4, pp. 4638–52, Feb. 2013.
- [2.62] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [2.63] M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow, and J. P. Dakin, "Optical in-fibre grating high pressure sensor," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 4, p. 10.1049/el:19930267, 1993.
- [2.64] J. H. Cole, G. Cogdell, and T. G. Giallorenzi, "Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory," *Washingt. Acad. Sci.*, vol. 90, no. 3, pp. 40–57, 2004.
- [2.65] Y. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 355–375, Apr. 1997.
- [2.66] S. E. U. Lima, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. a. Ferreira, J. L. Santos, V. Miranda, and O. Frazão, "Fiber laser sensor based on a phase-shifted chirped grating for acoustic sensing of partial discharges," *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 1, pp. 44–51, Mar. 2012.
- [2.67] S. Y. Li, N. Q. Ngo, and Z. R. Zhang, "Tunable fiber laser with ultra-narrow linewidth using a tunable phase-shifted chirped fiber grating," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, no. 17, pp. 1482–1484, 2008.
- [2.68] A. I. Azmi, I. Leung, X. Chen, S. Zhou, Q. Zhu, K. Gao, P. Childs, and G. Peng, "Fiber laser based hydrophone systems," *Photonic Sensors*, vol. 1, no. 3, pp. 210–221, Jan. 2011.
- [2.69] L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo, and M. López-Amo, "Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability," *J. Light. Technol.*, vol. 19, no. 4, pp. 553–558, 2001.
- [2.70] T. Liu, L. Hu, and M. Han, "Multiplexed fiber-ring laser sensors for ultrasonic detection," *Opt. Express*, vol. 21, no. 25, p. 30474, 2013.
- [2.71] C. a F. Marques, L. Bilro, L. Kahn, R. a. Oliveira, D. J. Webb, and R. N. Nogueira, "Acousto-optic effect in microstructured polymer fiber bragg gratings: Simulation and experimental overview," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 10, pp. 1551–1558, 2013.

Capítulo 3

- [3.1] G. Wild and S. Hinckley, “Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors: Overview and State-of-the-Art,” *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 7, pp. 1184–1193, Jul. 2008.
- [3.2] G. B. Hocker, “Fiber-optic sensing of pressure and temperature,” *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 9, p. 1445, May 1979.
- [3.3] IEEE-Std-C57.127TM-2007, “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors,” 2007.
- [3.4] R. T. Harrold, “Acoustical Techniques for Detecting and Locating Electrical Discharges,” in *Engineering Dielectrics Vol 1: Corona Measurement and Interpretation*, R. Bartnikas and E. J. McMahon, Eds. ASTM Special Technical Publication 669, 1979, pp. 358–408.
- [3.5] E. Howells and E. T. Norton, “Detection of Partial Discharge in Transformers Using Acoustic Emission Techniques,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 97, no. 5, pp. 1538–1549, 1978.
- [3.6] C. K. Kirkendall and A. Dandridge, “Overview of high performance fibre-optic sensing,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 197–216, 2004.
- [3.7] J. Deng, “Development of Novel Optical Fiber Interferometric Sensors with High Sensitivity for Acoustic Emission Detection Development of Novel Optical Fiber Interferometric Sensors with High Sensitivity for Acoustic Emission Detection,” Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2004.
- [3.8] A. K. Lazarevich, “Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor by,” M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, USA, 2003.
- [3.9] L. Song, “Detection and Position Location of Partial Discharges in Transformers Using Fiber Optic Sensors,” M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2004.
- [3.10] S. E. U. Lima, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. a. Ferreira, J. L. Santos, V. Miranda, and O. Frazão, “Fiber laser sensor based on a phase-shifted chirped grating for acoustic sensing of partial discharges,” *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 1, pp. 44–51, Aug. 2012.
- [3.11] E. Howells and E. Norton, “Parameters Affecting the Velocity of Sound in Transformer Oil,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, no. 5, pp. 1111–1115, May 1984.

- [3.12] R. T. Harrold, "Ultrasonic Spectrum Signatures of Under-Oil Corona Sources," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-10, no. 4, pp. 109–112, Dec. 1975.
- [3.13] R. Meunier and G. H. Vaillancourt, "Propagation behaviour of acoustic partial discharge signals in oil-filled transformers," in *12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, 1996, pp. 401–404.
- [3.14] L. E. Lundgaard, "Partial Discharge-Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection -Fundamental Considerations," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 25–31, Jul. 1992.
- [3.15] J. Rubio-Serrano, M. Rojas-Moreno, J. E. Posada-Roman, J. Martínez-Tarifa, G. Robles, and J. Garcia-Souto, "Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 5, pp. 1569–1578, Oct. 2012.
- [3.16] I. Bua-Nunez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano, and J. a. Garcia-Souto, "Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, pp. 1–1, 2013.
- [3.17] a. B. Lobo Ribeiro, N. F. Eira, J. M. Sousa, P. T. Guerreiro, and J. R. Salcedo, "Multipoint Fiber-Optic Hot-Spot Sensing Network Integrated Into High Power Transformer for Continuous Monitoring," *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 7, pp. 1264–1267, Jul. 2008.
- [3.18] M. P. Saravolac, "The use of optic fibres for temperature monitoring in power transformers," in *Condition Monitoring and Remanent Life Assessment in Power Transformers, IEE Colloquium on*, 1994, pp. 7/1–7/3.
- [3.19] J.-N. Bérubé, J. Aubin, and W. McDermid, "Transformer winding hot spot temperature determination," *Electric Energy Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 22–27, Mar-2007.
- [3.20] G. McDonald, M. Soileau, and M. Auger, "Toward increased reliability in the electric power industry: Direct temperature measurement in transformers using fiber optic sensors," in *Opto-Contact: Workshop on Technology Transfers, Start-Up Opportunities, and Strategic Alliances*, 1998, Proc. SPIE, vol. 3414, pp. 107–111.
- [3.21] T. Lundquist and W. Knuth, "Finally fiber optic sensing of power transformer 'Hotspots' is paying off," in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, pp. 819–824.

Capítulo 4

- [4.1] V. V. Protopopov, *Laser Heterodyning*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [4.2] S. Yoon, Y. Park, and K. Cho, “A new balanced-path heterodyne I / Q-interferometer scheme for low environmental noise , high sensitivity phase measurements for both reflection and transmission geometry .,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 18, pp. 20722–20729, 2013.
- [4.3] D. Lin, Z. Yue, N. Song, Y. Meng, and C. Yin, “A double common-path heterodyne interferometer for the measurement of flying height modulation,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 55303 –55303, May 2008.
- [4.4] C. Lin, C. Yu, and C. Chen, “Design of a full-dynamic-range balanced detection heterodyne gyroscope with common-path configuration.,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 8, pp. 9947–58, Apr. 2013.
- [4.5] S. Hitchman, K. Van Wijk, N. Broderick, and L. Adam, “Heterodyne interferometry for the detection of elastic waves: a tutorial and open-hardware project,” *Eur. J. Phys.*, vol. 36, no. 3, p. 035011, 2015.
- [4.6] W. B. Leigh, *Devices for Optoelectronics*. New York, USA: CRC Press, 1996.
- [4.7] B. Davarcioglu, “An Overview of Diode Pumped Solid State (DPSS) Lasers,” *Int. Arch. Appl. Sc. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 2010.
- [4.8] J. Hrabina, J. Lazar, M. Holá, and O. Cíp, “Frequency noise properties of lasers for interferometry in nanometrology.,” *Sensors (Basel)*, vol. 13, no. 2, pp. 2206–19, Jan. 2013.
- [4.9] A. D. Kersey, K. J. Williams, A. Dandridge, and J. F. Weller, “Characterization of a Diode Laser-Pumped Nd:YAG Ring Laser for Fiber Sensor Applications,” in *Optical Fiber Sensors*, 1989, vol. 44, pp. 172–178.
- [4.10] D. A. Jackson, “Recent progress in monomode fibre-optic sensors,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 621–638, 1994.
- [4.11] Z. Wang, Y. Yang, Y. Li, X. Yu, Z. Zhang, and Z. Li, “Quadrature demodulation with synchronous difference for interferometric fiber-optic gyroscopes.,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 23, pp. 25421–31, Nov. 2012.
- [4.12] E. Zhang, B. Chen, L. Yan, T. Yang, Q. Hao, W. Dong, and C. Li, “Laser heterodyne interferometric signal processing method based on rising edge locking with high frequency clock signal.,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 4, pp. 4638–52, Feb. 2013.

- [4.13] B. Griffin and M. J. Connelly, "Digital signal processing of interferometric fiber optic sensors," in *Proceedings of the Lightwave Technologies in Instrumentation and Measurement Conference*, 2004, pp. 153–156.
- [4.14] C. Ziomek and P. Corredoura, "Digital I/Q demodulator," in *Particle Accelerator Conference*, 1995, vol. 4, pp. 2663–2665.
- [4.15] J. Bush and A. Cekorich, "Multichannel interferometric demodulator," in *Third Pacific Northwest Fiber Optic Sensor Workshop*, 1997, Proc. SPIE, vol. 3180, pp. 19–29.
- [4.16] L. Wang, M. Zhang, X. Mao, and Y. Liao, "The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors," in *Interferometry XIII: Techniques and Analysis*, 2006, Proc. SPIE, vol. 6292, p. 62921E.
- [4.17] H. Zhang and M. Zhang, "Analysis of total harmonic distortion in phase generated carrier demodulation algorithm by digital arctangent approach," in *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing*, 2013, Proc. SPIE, vol. 9043, p. 90430M.
- [4.18] Z. Meng, Y. Hu, S. Xiong, G. Stewart, G. Whitenett, and B. Culshaw, "Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer.," *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 17, pp. 3425–8, Jun. 2005.
- [4.19] K. J. Williams, A. Dandridge, A. D. Kersey, J. F. Weller, A. M. Yurek, and A. B. Tveten, "Interferometric measurement of low-frequency phase noise characteristics of diode laser-pumped Nd:YAG ring laser," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 12, p. 774, 1989.
- [4.20] S. Haykin and M. Moher, *Communication Systems*, 5th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [4.21] N. Zhang, Z. Meng, W. Rao, and S. Xiong, "Investigation on upper limit of dynamic range of fiber optic interferometric sensors base on the digital heterodyne demodulation scheme," in *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2012, Proc. SPIE, vol. 8421, no. 1, p. 8421BE–8421BE–4.
- [4.22] L. Algie L., S. Wendell D., and L. Frederik, "Phase Noise and AM Noise Measurements in the Frequency Domain," in *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 11, K. J. Button, Ed. Academic Press, 1984, pp. 239–289.

Capítulo 5

- [5.1] J. Rubio-Serrano, M. Rojas-Moreno, J. E. Posada-Roman, J. Martínez-Tarifa, G. Robles, and J. A. García-Souto, “Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 5, pp. 1569–1578, Oct. 2012.
- [5.2] IEC-60270, “High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements.” 2002.
- [5.3] K. C. Kao, “Electrical Aging, Discharge, and Breakdown Phenomena,” in *Dielectric Phenomena in Solids — With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes*, Academic Press, 2004, pp. 515–572.
- [5.4] I. Búa-Núñez, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano, and J. A. García-Souto, “Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 5, pp. 1002–1013, Nov. 2014.
- [5.5] S. Markalous, S. Tenbohlen, and K. Feser, “Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, pp. 1576–1583, Dec. 2008.
- [5.6] IEEE-Std-C57.127TM-2007, “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors,” vol. 2007, no. August. 2007.

Capítulo 6

- [6.1] D. H. Shroff, M. S. Eng, C. Eng, A. W. Stannett, and B. S. Eng, “A review of paper aging in power transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 132, no. 6, pp. 312 – 319, 1985.
- [6.2] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, “Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 230–239, Jan. 2004.
- [6.3] M. R. Meshkatoddini, “Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil,” *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 384–388, Apr. 2008.
- [6.4] M. Martins, “Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers- experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 26, no. 6, pp. 7–13, Nov. 2010.
- [6.5] K. Miyagi, E. Oe, N. Yamagata, and H. Miyahara, “Thermal aging characteristics of insulation paper in mineral oil in overloaded operation of transformers,” *Electr. Eng. Japan*, vol. 182, no. 2, pp. 1–8, Jan. 2013.
- [6.6] D. A. Jackson and M. J. Cole, “Fiber optic interrogation systems for hypervelocity and low velocity impact studies,” *Photonic Sensors*, vol. 2, no. 1, pp. 50–59, Sep. 2012.
- [6.7] T. Liu, L. Hu, and M. Han, “Multiplexed fiber-ring laser sensors for ultrasonic detection,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 25, p. 30474, 2013.
- [6.8] S. E. U. Lima, O. Frazão, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, V. Miranda, and J. L. Santos, “Fibre laser sensor based on a phase-shifted chirped grating for acoustic sensing of partial discharges in power transformers,” in *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7653, pp. 765335–765335–4.
- [6.9] D. A. Jackson, A. D. Kersey, M. Corke, and J. D. C. Jones, “Pseudoheterodyne detection scheme for optical interferometers,” *Electron. Lett.*, vol. 18, no. 25–26, p. 1081, 1982.
- [6.10] A. Dandridge, A. B. Tveten, and T. G. Giallorenzi, “Homodyne Demodulation Scheme for Fiber Optic Sensors Using Phase Generated Carrier,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 30, no. 10, pp. 1635–1641, Oct. 1982.

Anexos

Anexo A. Atenuación característica de una EA de 150 kHz en agua

Para comprobar que la atenuación de las EA a 150kHz generadas en agua, dentro de la plataforma experimental construida para la caracterización del sensor de FO, se realizó un ensayo en el que se midió la amplitud de la señal acústica recibida a diferentes distancias de la fuente de emisión. El esquema utilizado es el mismo que se ha descrito en la sección 3.4.1.1, utilizando un transductor Brüel & Kjaer modelo 8103 para generar las EA de 150kHz en agua y otro igual para detectarlas. Los resultados obtenidos en esta caracterización se muestran en la figura A.1.

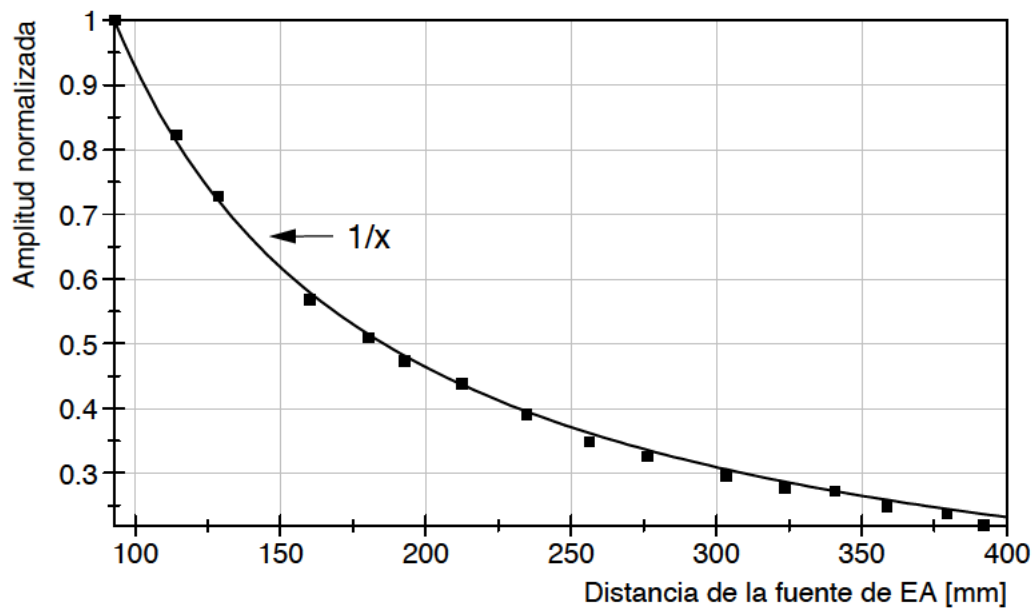


Figura A.1. Atenuación característica de una EA de 150 kHz en agua.

Con los resultados mostrados en el gráfico anterior se puede comprobar que en un medio de propagación como el agua, la atenuación de una EA con una frecuencia alrededor de 150kHz se comporta de forma similar a la observada en el aceite de transformador, siguiendo un comportamiento inversamente proporcional con la distancia de la fuente de emisión ($1/x$).

Anexo B. Respuesta de la etapa de filtrado paso-banda integrada en la cadena de medida del sistema interferométrico con estabilización homodina activa

En la cadena de medida del sistema interferométrico con estabilización homodina activa, descrita en el apartado 3.4.1.2, se incluye una etapa electrónica de filtrado paso-bajo con el fin de limitar el ancho de banda de detección a las frecuencias de interés; es decir, entre 100 kHz - 300 kHz.

La etapa de filtrado está construida con un filtro integrado configurable embebido en un chip modelo MAX 275. Una vez implementado el sistema, la etapa de filtrado fue caracterizada a para obtener su respuesta en frecuencia, la cual se puede observar en la figura B.1.

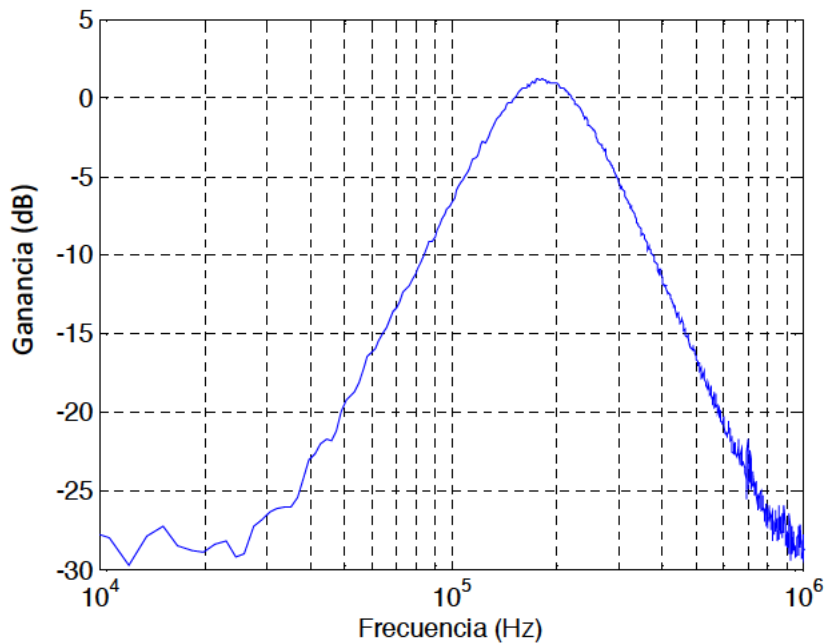


Figura B.1. Respuesta en frecuencia de la etapa de filtrado paso-banda implantada en la cadena de medida con el interferómetro homodino.

Anexo C. Medida del ruido de salida de los módulos fotodetectores

En el sistema de instrumentación, la detección de la señal interferométrica se realiza con módulos fotodetectores modelo Thorlabs PDB 410A. Con el fin de conocer el nivel de nivel de ruido introducido por los módulos fotodetectores se realizó una medida del espectro de ruido típico de salida en los módulos. En la Fig. C.1. se muestra el resultado obtenido de esta medición.

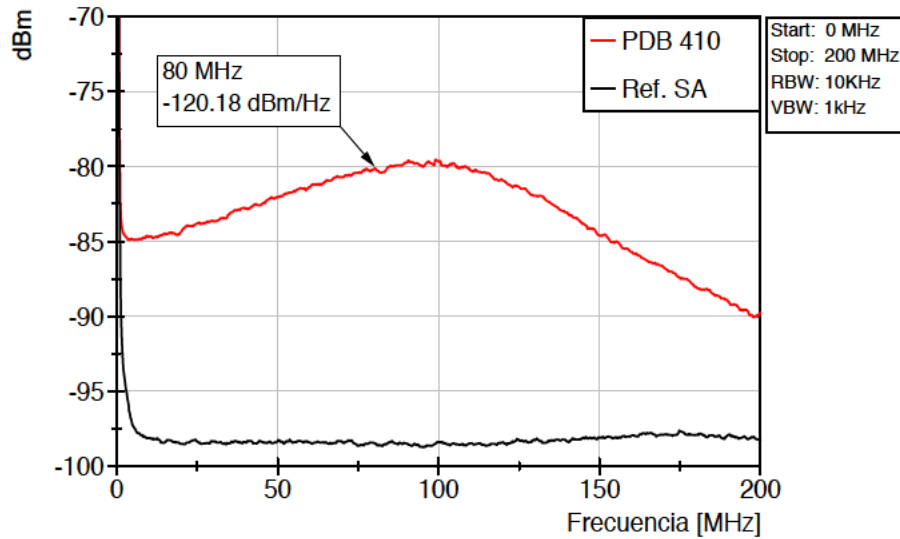


Figura C.1. Medida espectral del ruido a la salida de los módulos fotodetectores modelo PDB 410.

El gráfico anterior se muestra la medida del ruido de salida del módulo fotodetector obtenida con un analizador de espectro, junto con una medida del nivel de ruido fondo del propio analizador de espectro que fue tomada como referencia. A una frecuencia de 80 MHz el módulo fotodetector muestra un ruido de -120 dBm/Hz. La tensión de ruido de salida V_{rms} puede ser calculada a partir de la expresión:

$$10 \text{ Log}(V_{rms}^2) = P - 30\text{dBm} + 10 \text{ Log}(Z) \quad (\text{C.8})$$

donde P es la potencia medida en expresada dBm y Z es la impedancia de entrada del analizador de espectro, que para las medidas tomadas fue 50 ohm. Calculando V_{rms} para la densidad de potencia de ruido medida anteriormente (-120 dBm/Hz) se obtiene una densidad espectral de ruido en tensión de $0.22 \mu V_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Anexo D. Medida del ruido de fase del generador de funciones

El generador de funciones utilizado para la excitación del AOM y en la etapa de conversión a frecuencia intermedia de la señal portadora es el modelo RIGOL DG4162. Para realizar la medida fue necesario emplear el esquema que se muestra en la figura D.1. La amplitud de la señal de 5 MHz fue ajustada hasta obtener el mismo nivel que el de la portadora de frecuencia intermedia utilizado en el sistema de instrumentación, esto es 1Vpp (4 dBm). Los resultados de esta medida se presentan en la Fig. D.2.

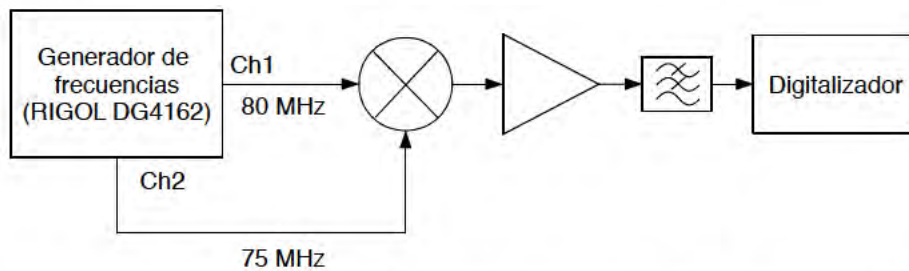


Figura D.1. Esquema empleado para la medida del ruido de fase del generador de funciones.

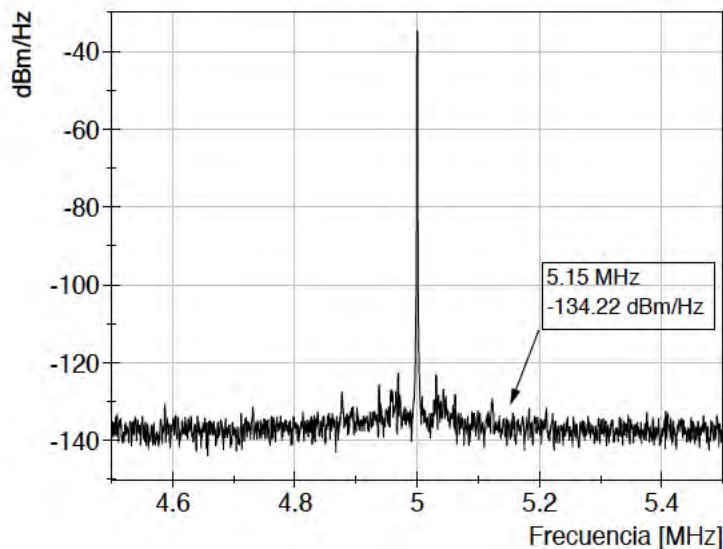


Figura D.2. Medida del ruido de fase a la salida del generador de funciones modelo DG4162.

Se puede observar en el gráfico que la densidad espectral de potencia de ruido medida a 150 kHz de la portadora es de -134 dBm/Hz. Una vez más utilizando la ec. C.1, se obtiene que densidad espectral de ruido en tensión es $0.043 \mu V_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$.



Universidad
Carlos III de Madrid

Department of Electronics Technology

Extended Summary of the PhD Thesis

Multichannel instrumentation system with
optical fiber heterodyne interferometer.
Application to the detection and localization
of ultrasound acoustic emissions generated
by partial discharges.

Author: Julio Enrique Posada Román

Advisor: Prof. José A. García Souto

Leganes, July 2015

Preface

Since the extended document of the dissertation has been written in Spanish, except the abstract and the conclusions, this report has been written to provide a complete version to the international research community and, in particular, to the members of the dissertation defense committee and the international experts. It is not a translation of the dissertation but a summary on the basis of the research full papers that are more relevant to the dissertation and were published in journals during its development. The body of the dissertation is summarized in this document with emphasis on the most important aspects and achievements.

The aim of this research was to develop an optoelectronic instrumentation system able to detect the projection on several points (multipoint / multi-channel) of the acoustic emissions from partial discharges in oil-paper insulated transformers. It is based on fiber optic sensors installed inside the transformers and has the capability of localizing the acoustic emission sources and consequently, the origin of failures in the insulation system.

In a first stage of this research, the state of the art of internal fiber optic sensors for the acoustic measurement of partial discharges in transformers was studied. As a result, a new fiber-optic interferometric sensor for the acoustic detection of partial discharges and a new multi-channel interferometric scheme for the multipoint detection of acoustic emissions were proposed and successfully implemented.

The fiber-optic sensing head was characterized in an acoustic test bench that was designed for ultrasound tests. It was also characterized in a high voltage platform that is able to generate partial discharges in transformer oil. In these tests it was demonstrated that this new fiber-optic interferometric sensor is the most suitable for the transformer application in comparison with other internal sensors reported to date.

The proposed multichannel interferometric system was deployed and demonstrated for an implementation of four channels (4 sensors). During the characterization of the

complete system, the capability of multipoint simultaneous detection and the localization of acoustic emission sources were demonstrated.

Some future research works are proposed as a result of this dissertation. These are focused on new applications of the multichannel heterodyne interferometric system and a new multiplexing interferometric scheme for the measurement of acoustic emissions using FBG sensors.

Abstract

On-line monitoring of power transformers is essential to guarantee their stable and safe operation. Partial discharges monitoring is one of the reliable methods used for this purpose. Partial discharges are local electrical breakdowns that only partially break the insulation. Their activity is involved in the degradation process of the transformers and provides information about the internal conditions of the insulation system, which is used for the diagnosis of power transformers. Partial discharges generate ultrasound acoustic emissions that are used for the acoustic measurement of their activity. In other words, a fault in the insulation behaves as a localized acoustic emission source. The acoustic monitoring of partial discharges exploits this characteristic in order to localize faults in the insulation system. The localization of partial discharges is only possible using a multichannel system able to obtain the times of arrival of the acoustic signals at the multiple sensors and use them in a computational localization algorithm.

The conventional acoustic monitoring of partial discharges is done with piezoelectric sensors mounted on the transformer tank walls. However, the method suffers from some problems due to the external installation of the sensors. The detected signals are weak and distorted. There are multiple paths to the sensors and reflections at the tank walls. In the last decade, new sensors have been proposed for their internal installation within the transformer tank in order to avoid such problems. These sensors use optical fiber technology to withstand the harsh environment inside the transformers. A variety of them have been proposed: sensors based on Fabry-Perot cavities, fiber-optic interferometric sensors and sensors based on fiber Bragg gratings. With the development of these fiber-optic internal sensors a new research interest has also arisen about the development of new multichannel instrumentation systems for the localization of partial discharges using fiber-optic sensors.

This dissertation is devoted to these both topics. A major contribution is the design and development of a multichannel interferometric instrumentation system for

acoustic monitoring of partial discharges and their localization by using fiber-optic sensors. The design of the multichannel system is based on a fiber-optic heterodyne interferometer that is configured as a Mach-Zehnder scheme with multiple sensing arms in parallel and a common reference arm. This interferometric multiplexing system has been demonstrated with four channels in which a high resolution is obtained in the measurement of acoustic pressure (1 Pa @ 150 kHz). The capability of this system for localizing the acoustic emission sources by means of the simultaneous measurement with multiple sensors has also been demonstrated experimentally. In addition, in these experiments synthetic noise was added to the measurements of the times of arrival in order to evaluate the performance of the system. The results of the acoustic source localization show a standard deviation better than 1 cm in each axis ($\sim 1\%$ of the normalized dimension of the tank).

The second major contribution is the research and development of a fiber-optic probe, compatible with the multichannel interferometric system. The design of the fiber-optic sensing head is based on a coil of optical fiber with multiple layers. It is compact, rugged and cost-effective. An adequate sensitivity was achieved with 17 m of fiber disposed in a coil with 5 layers. Combined with the heterodyne interferometer the fiber-optic interferometric sensor is able to detect the acoustic emission of partial discharges at 150 kHz with resolution of 1 Pa in a range of up to 17 kPa. The complete characterization of the fiber-optic probe was performed in an acoustic test bench that was designed for ultrasound tests with acoustic emissions that reproduce the characteristics of those generated by partial discharges. The fiber-optic sensing probe has also been characterized in high voltage experiments, where different types of partial discharges were generated in transformer oil and in different conditions. It was tested in high voltage AC setups, with internal partial discharges, with surface partial discharges, and also in high voltage DC setups, thus its effectiveness for detecting partial discharges under a wide range of conditions was demonstrated. It is worth mentioning that the acoustic detection of internal partial discharges in a transformer with a fiber-optic sensor was demonstrated for the first time.

Keywords: Multichannel instrumentation system, fiber optic heterodyne interferometer, fiber-optic interferometric sensor, acoustic emission, ultrasound, partial discharges.

Contents

1 Introduction	143
2 State-of-the-art sensors for the acoustic detection of partial discharges	149
3 The fiber optic sensing probe for the acoustic measurement of partial discharges..	154
4 The multichannel fiber optic heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in transformers	166
5 Experimental results related to the application	177
6 Conclusions and future work	181
List of publications related to this research work	188
References	191

1 Introduction

Power transformers are essential in the electricity distribution grid and continuous operation for a long time is required for efficiency. The need to maintain the transformers in service and the new trends towards more efficient electricity transportation networks, such as the high-voltage direct-current grids (HVDC) [1], have aroused a continuous interest on researching new better monitoring systems and tools for the condition assessment of power transformers [2]–[9]. They are mainly focused on the internal insulation system, which is the most critical for a safe, stable and reliable operation. The on-line monitoring systems are of main interest because they keep the transformer in service and maximize its availability. Moreover, the on-line monitoring enables the detection of incipient faults, which allows the application of appropriate preventive actions before severe faults occur [10]–[12].

Among the on-line monitoring techniques two of them provide more information about the insulation condition: the dissolved gas analysis (DGA) and the detection of partial discharges (PD). DGA is a commonly used conventional technique. It consists on the measurement of the concentration of certain gases liberated as byproducts of faults in the insulation. The composition of these gases depends on the type of fault. By means of DGA some faults can be detected and classified, such as overheating, arcing and even the effects of partial discharges [13], [14]. DGA tests are usually performed in a laboratory with oil samples taken from the transformer; however, nowadays DGA systems are available to be installed in the transformer and for continuous monitoring. Although DGA is a reliable diagnosis technique, the delay introduced between a fault occurrence and the generation of enough gases to be detected is a drawback. Moreover, DGA does not provide information about the location of the fault. Localization of faults is possible with techniques such as acoustic detection of PD and is useful in large apparatus such as power transformers.

PD are small discharges in electrical insulators as a result of an electrical breakdown (e.g. in a gas void) or due to a highly non-uniform electrical field [15]. The PD activity is related to the degradation of the transformer insulation system; therefore, PD monitoring is used as a diagnosis tool in transformers. When a PD occurs a sudden release of energy

is produced in multiple forms such as chemical and structural changes in materials, electromagnetic radiation and acoustic emissions (AE), among others, which can be used for the indirect detection of PD. The main techniques used for PD detection through their byproducts are DGA, electrical detection of signals in the HF and VHF bands [16], electromagnetic detection of radiated signals in the UHF band [17], [18] and the detection of ultrasound AE [19]. Among these techniques, only the AE and the UHF provide information about the location of the zone where PD activity is produced. This is possible because PD behaves as a localized source of radiation that generates AE and UHF signals. The position of such sources, and hence of the fault in the insulation, can be found by means of localization techniques. The trilateration is typically used for this purpose. It is based on the time of arrival (TOA) of the signals from PD to several sensors located in different points of the space. Therefore, a multichannel system for the simultaneous detection of the signals from PD with multiple sensors is needed.

Although the detection and localization of PD sources using UHF techniques has been tested in transformers [20]–[22], the installation of the UHF sensors is a drawback because they need the previous installation of dielectric windows on the transformer tank in order to allow the UHF signals to reach the sensors. Moreover, reflection and refraction of UHF signals produced by e.g. the transformer core, the copper windings, etc. produce multiple paths to reach the sensors that hinder the localization of PD sources.

The detection and localization of PD by means of AE is usually done with piezoelectric (PZT) sensors placed on the tank wall using magnetic holders; therefore, they do not need the previous installation of a mounting point. Moreover, when low amplitude AE signals are detected, they can be relocated in order to find a more favorable place where stronger signal levels are obtained. Ultrasound AE from PD are typically detected in a frequency range of 100 kHz – 300 kHz using PZT sensors that have a resonance frequency of 150 kHz.

As in the case of the UHF detection technique, the multiple signal paths of the AE through the tank walls can affect the acoustic PD detection and localization. In addition, the attenuation of the AE signal through the propagation media (mainly, transformer oil), and also in the oil-metal interface when acoustic signals reach the tank walls, degrades the AE signals and reduces the signal levels making difficult their detection. In order to overcome these problems, in the last decade and during the research for this dissertation,

new sensors for the installation within the transformer tank have been researched and developed [23]–[26]. These use fiber optic (FO) technology to withstand the harsh environment within the transformer. The internal installation of this type of sensor provides a unique advantage as they can detect louder and clearer signals. The research in this type of sensor for the acoustic detection of PD has also motivated the research in new optoelectronic instrumentation systems for the simultaneous multipoint detection with FO sensors in order to monitor and localize faults in transformers [27].

In this dissertation, the design and development of a new optoelectronic instrumentation system for monitoring power transformers using AE techniques and multiple internal FO sensors is presented. The development of the FO interferometric probe for acoustic measurements of PD is also shown. In addition to the on-line monitoring, this instrumentation system is able to localize faults in the insulation based on the TOA measurements of the AE.

Objectives of the research

The main objective of this research work is to develop a new multichannel instrumentation system with fiber optic sensors for the detection of ultrasound acoustic emissions generated by partial discharges. Based on the above, the following partial objectives are set:

- To study and update the state-of-the-art fiber-optic sensors for the acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated transformers.
- To develop a new fiber-optic interferometric sensor for the measurement of acoustic emissions generated by partial discharges of all kinds.
- To characterize the fiber-optic probe exhaustively in order to demonstrate its suitability for the acoustic measurement of partial discharges.
- To validate the fiber-optic probe in setups of different partial discharges generated with high voltage in transformer oil.
- To develop and characterize the multichannel heterodyne interferometer for an implementation of four channels (4 sensors).

- To demonstrate the localization capability of the multichannel interferometric system experimentally.

Dissertation outline

The dissertation is structured in six chapters. In chapter 1, the motivation and the objectives of this research work are presented. This is summarized in the first section of this report.

The state of the art of FO sensors for the acoustic measurement of PD is presented in chapter 2. First, the main characteristics of AE from PD and the different types of PD are studied to provide the specifications of the fiber-optic sensors and of the measurement system. The state of the art is studied focused on three types of sensors proposed for the acoustic detection of PD, these are: sensors based on Fabry-Perot cavities, FO interferometric sensors and sensors based on fiber Bragg gratings (FBG). The most relevant characteristics of each are synthesized and, finally, a discussion is included in which a multi-channel interferometer system for multi-point detection of AE with FO interferometric sensors is proposed for the application of PD monitoring. Upgraded sensors and systems are also included, even though they were developed in parallel with this research and were reported later than the proposal. This chapter is summarized in section 2 of this report.

Chapter 3 is devoted to the design of the FO interferometric sensor developed for the acoustic measurement of PD. The principle of sensing and the design of the FO sensing probe from a length of optical fiber to a compact, rugged and cost-effective sensing head is presented. This FO sensing probe was designed for AE of 150 kHz. The exhaustive characterization (sensitivity, frequency response and directionality) was done. Adequate characterization for the acoustic detection of PD was achieved with this probe. A read-out FO interferometer for the measurement with this FO probe was also developed for a compact, rugged and portable instrument, which allows its use in real setups out of the laboratory, such as in the high-voltage installations where the acoustic measurements of PD were done immersed in transformer oil. A summary of this chapter based on the journal paper in which this sensor was reported is presented in section 3 of this report. The results that are focused on PD detection in high-voltage setups are also reported in the same full paper attached to the section 3.

The design of the multichannel interferometric system for the detection of AE with FO interferometric sensors is presented in chapter 4. First, heterodyne laser interferometry is introduced. The design of the multichannel interferometer is presented for an implementation of four channels. The characterization of the laser, the digital phase demodulator, the noise of the system and the simultaneous measurements with multiple sensors are shown. Section 4 of this report summarizes this chapter based on the journal paper in which the multichannel fiber-optic heterodyne interferometer was reported. The measurement of the TOA of AE signals and the proposed configuration for monitoring three-phase power transformers are also included in this paper.

In chapter 5 the experimental results that focus on the application of detection and location of PD are presented. They are the tests performed for the characterization of the FO sensing probe in high-voltage setups and the localization of AE sources with the multichannel instrumentation system. These results have been reported in the corresponding papers of sections 3 and 4 of this report and are cited in section 5. Moreover, other unpublished results obtained in experiments performed with the aim of localizing AE sources are also included in this section.

Finally, the conclusions and the proposed future work are presented in chapter 6. Section 6 of this report is literally chapter 6 of the dissertation. In this section, the most remarkable contributions are highlighted and a list of the most relevant publications related to this research work is also included.

Research projects and collaborations

This research work has been supported by the Spanish National Ministry of Science and Innovation under the coordinated project: “*Multichannel instrumentation system for in field measurements of partial discharges using integrated acoustic and electrical sensors. Application to the localization and analysis of PD in high power transformers*” (DPI2009-14628-C03-0, Coordinator Prof. José A. Garcia Souto) and the subproject: “*Multichannel fiber optic interferometer for the measurement of PD inside transformers. New on-line ultrasound instrumentation for the detection and localization of PD in-situ*” (No DPI2009-14628-C03-01, P.I. Prof. José A. Garcia Souto).

The acoustic measurements of PD in HVAC setups were carried out in the Laboratory of Research and Testing on High Voltage (LINEALT) of the University Carlos III of Madrid, in collaboration with the Group of Diagnosis of Electrical Machines and Materials (DIAMAT), department of Electrical Engineering, in the context of the coordinated project (DPI2009-14628-C03-0).

The acoustic measurements of PD in HVDC setups were carried out in collaboration with the department of Electrical Engineering of the University of Bologna, Italy. These were performed during a research stay of I. Bua-Núñez and a short visit of the author supervised by Prof. Andrea Cavallini in 2013.

A research focused on fast interrogation systems for ultrasound measurements with FBG sensors was performed in collaboration with INESC – Porto, Portugal, during a research stay of the author supervised by Prof. Jose Luis Santos in 2013.

A research focused on the development and installation of a fiber-optic heterodyne interferometer for the simultaneous measurement with four channels was performed in collaboration with the Applied Optics Group of the University of Kent, UK, during a 3 months research stay of the author supervised by Prof. David A. Jackson in 2014.

2 State-of-the-art sensors for the acoustic detection of partial discharges

A comprehensive study of the state of the art of FO sensors and the multiplexed systems for the multichannel detection of PD has been performed. This is presented in chapter 2 of the dissertation and summarized in this section. Basically, there are three types of FO sensors proposed for the acoustic detection of PD; these are: sensors based on Fabry-Perot (FP) cavities, which were proposed for the first time in Virginia Tech [23] and New Jersey Institute of Technology [24] and later by other versions [28]–[30], FO interferometric sensors [31]–[33] and sensors based on FBG [34], which were proposed by INESC-Porto. The most relevant characteristics of these sensors, such as resolution, detection bandwidth, etc. have been studied and they are summarized in table I.

Characteristics	Low Finesse Fabry-Perot	FBG	* FO Interferometric
Resolution	~10 Pa - 20 Pa	~10 Pa	1 Pa
BW	90 kHz – 300 kHz	100 kHz – 300 kHz	100 kHz – 300 kHz
Resonance	90 kHz – 300 kHz	150 kHz	150 kHz
Directivity	$\pm 30^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 30^\circ$
Probe size and geometry	< 1 cm	Cylindrical mandrel 1 cm \varnothing ; 2cm long	FO coil \varnothing range 1 cm – 3 cm
Fabrication	MEMS	Phase Shifted Chirped FBG	FO coil
Multiplexed System	Difficult	Expensive	Feasible
* Results obtained in this dissertation			

Table I. Comparative among the best achieved characteristics of the FO sensors proposed for acoustic partial discharge measurement

If the three types of internal FO sensors for acoustic detection of PD are compared, the sensors based on FP are in a considerably more advanced state of development. The published works related to FP sensors of PD show that a great effort was devoted to the development of this type of sensors and also to the instrumentation system for recovering the optical phase measurement.

In general, the three types of sensors have similar characteristics for their basic use in a scheme of detection of AE in the application. The typical resolution of these sensors is in the range of 1 Pa – 10 Pa. Similarly, although the frequency response is slightly different for some of them, in all cases they have a peak of resonance around 150 kHz, which is the typical detection frequency used with PZT sensors for the acoustic measurements of PD. However, there are remarkable differences among them regarding to other issues such as the complexity of the manufacturing, the size and the ability to be integrated in a multiplexed system. This last is particularly important because the multipoint detection of the AE is the key for the localization of PD sources in power transformers.

Regarding the multiplexing sensor system, simultaneously with the research of this dissertation, a FP multi-sensor system has been proposed for the application of PD acoustic detection [27]. It uses two wavelengths in order to obtain a quadrature detection of the interference signal.

It is well known that one of the main advantages of the sensors based on FBG is their multiplexing ability. However, the ring laser topology of the acoustic FBG sensor of PD makes difficult the implementation of a multiplexed system and it can also become expensive [34]. Even so, it could be cost effective for other applications. Recently, a multiplexed system which uses FBG sensors in ring lasers configuration has been proposed [35]. The results shown for the detection of ultrasounds are promising but its performance is still far from that needed for acoustic detection of PD.

Polymer optical fibers are more sensitive to acoustic emissions. FBG in microstructured polymer optical fibers have demonstrated more sensitivity and wider range in the measurement of ultrasound [36]. However, a comprehensive study is needed about possible effects on the fiber caused by an environment such as inside a transformer.

FO Interferometric sensors have been studied for years and there is an extensive knowledge about multiplexing systems with such sensors [37], [38]. In this research work a particular topology based on a fiber-optic Mach-Zehnder interferometer with multiple sensing arms in parallel and a common reference arm is proposed for this application [39]. The simplified scheme is shown in figure 1.

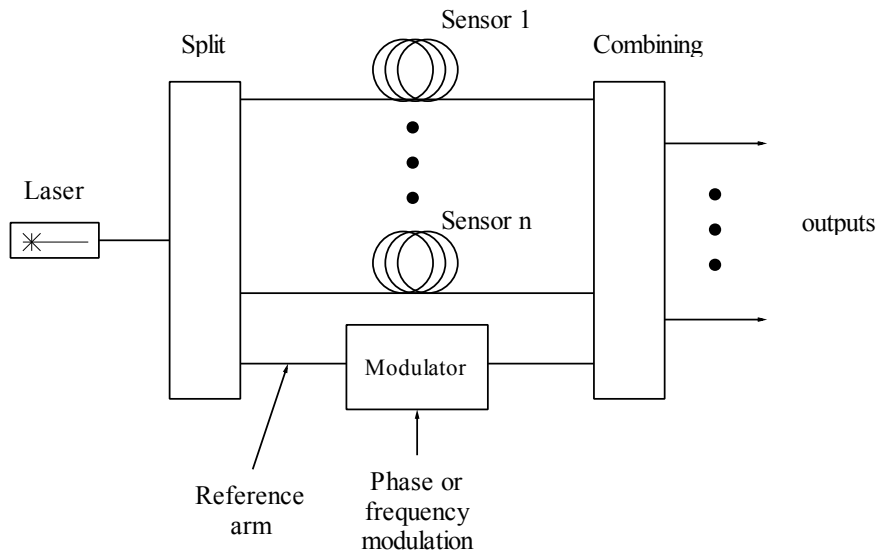


Figure 1. Scheme of the proposed multichannel instrumentation system

The modulation through the reference arm enables an implementation of a carrier approach for recovering the optical phase. The advantages of a carrier approach include an increase of the measurement range. Moreover, unlike the active homodyne stabilization approach, no feedback loops are needed in the scheme.

So far, a system like that proposed here for the application of acoustic detection of PD has not been reported. Therefore, it is considered as a main contribution of this research work and an advancement in PD sensing.

3 Fiber Optic Sensing Probe

**1st Major
Original Contribution**

Fiber Optic Sensor for Acoustic Detection of Partial Discharges in Oil-Paper Insulated Electrical Systems
Sensors **2012**, *12*, 4793-4802.

3 The fiber optic sensing probe for the acoustic measurement of partial discharges

The FO interferometric sensor has been designed to reproduce the characteristics of the PZT sensors that are commonly used for acoustic measurements of PD in transformers, e.g. similar sensitivity at frequency of 150 kHz, resonant peak frequency, etc. [40]. A read-out instrumentation system based on a fiber-optic Mach-Zehnder interferometer with active homodyne stabilization was also developed for the characterization of the FO probe. It was implemented in a portable and compact unit in order to facilitate the measurements in environments out of the laboratory. An adequate sensitivity of the FO probe was achieved by adjusting the fiber length of the sensor and a rugged and compact sensing head was finally obtained. This experimental study of the sensitivity is reported in [41], as well as the adjustment to the requirements of the application. The FO probe was also tested with partial discharges generated in a high voltage (HV) platform with electrodes immersed in transformer oil.

The complete design and characterization of the FO probe and also the experimental results in the HV setups with PD generated in transformer oil are reported in the full paper [42], which is attached below. In addition, other experiments focused on the acoustic measurements of PD with the fiber-optic sensor in HVDC setups were also performed [43].

In the attached paper, first, the principle of sensing and the previous design of the fiber-optic sensing probe are reported. The read-out interferometer and the electronic conditioning are also included. Second, a complete calibration of the sensor is presented: the frequency response, the sensitivity to ultrasound signals at 150 kHz and the directionality. Despite of previous designs with optical fiber coils detected AE at lower frequencies (15 kHz – 25 kHz) [31], [32], the proposed sensor has a flattened response in the range of 100 kHz to 300 kHz. Finally, the measurements of internal PD and surface PD with the fiber-optic sensor in HVAC setups are included in the paper.

Article

Fiber Optic Sensor for Acoustic Detection of Partial Discharges in Oil-Paper Insulated Electrical Systems

Julio Posada-Roman *, Jose A. Garcia-Souto and Jesus Rubio-Serrano

Department of Electronics Technology, Optoelectronics and Laser Technology Group, Universidad Carlos III de Madrid, Av. Universidad 30, E-28911 Leganés, Madrid, Spain; E-Mails: jsouto@ing.uc3m.es (J.A.G.-S.); jrserran@ing.uc3m.es (J.R.-S.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: jposada@ing.uc3m.es; Tel.: +34-91-624-5988; Fax: +34-91-624-9430.

Received: 16 January 2012; in revised form: 31 March 2012 / Accepted: 5 April 2012 /

Published: 12 April 2012

Abstract: A fiber optic interferometric sensor with an intrinsic transducer along a length of the fiber is presented for ultrasound measurements of the acoustic emission from partial discharges inside oil-filled power apparatus. The sensor is designed for high sensitivity measurements in a harsh electromagnetic field environment, with wide temperature changes and immersion in oil. It allows enough sensitivity for the application, for which the acoustic pressure is in the range of units of Pa at a frequency of 150 kHz. In addition, the accessibility to the sensing region is guaranteed by immune fiber-optic cables and the optical phase sensor output. The sensor design is a compact and rugged coil of fiber. In addition to a complete calibration, the *in-situ* results show that two types of partial discharges are measured through their acoustic emissions with the sensor immersed in oil.

Keywords: optical fiber sensors; interferometry; acoustic emission; ultrasounds; partial discharges; transformers

1. Introduction

Oil-paper insulation systems are commonly used in power apparatus such as power transformers and high voltage cables, among others. In power transformers the insulation system is the most important part of the internal insulation and it largely determines its operational reliability. Thus,

condition assessment of the insulation system in a timely manner, ensures reliable operation of the transformer, and maximizes equipment utilization [1].

Partial discharges (PD) are a cause and a symptom of the degradation of the insulation system and its activity monitoring is used as a tool for insulation condition assessment in power transformers [2]. PD are small electrical sparks present in an insulator as result of the electrical breakdown of a gas (for example air) contained within a void or in a highly non-uniform electric field [3]. The sudden release of energy caused when a PD occurs produces a number of effects like chemical and structural changes in the materials, electromagnetic signal generation and acoustic emissions (AE) [4]. These induced effects are used for its detection. Techniques such as dissolved gas analysis (DGA) electrical measurements of high frequency transients (HF-VHF), detection of electromagnetic signals generated in the UHF band and ultrasound AE detection are used for this propose. Among these techniques AE ultrasound detection offers great advantages such as the possibility of on-line testing and the ability to locate where PD activity is occurring, which is helpful in large test objects like power transformers.

The UHF technique has been applied to transformers for the detection and location of PD and show promising results [5,6]. However, the installation of the sensors is a drawback because they require an electromagnetic wave “view” into the tank, so the installation of a dielectric window that provides a mounting point for the sensors on the transformer tank is needed. Moreover, electromagnetic waves from PD are affected by reflections and refractions produced by obstacles such as the core, copper conductors, *etc.* producing multiple paths before arriving to the sensors, which complicates the localization of the source.

The detection and location of PD using AE techniques are commonly done with external piezoelectric (PZT) ultrasound sensors mounted on the tank wall, which have narrowband detection at 150 kHz. However, they suffer the same problem as UHF detection related to a multi-path signal and, in addition, to a low level detected signal as a consequence of the attenuation of the acoustic waves through the oil. Therefore, it is desirable to have sensors that can be placed inside the transformer, close to the PD, that overcome these problems.

Recently several fiber optic (FO) sensors of different types have been developed for PD detection within power transformers, such as those based on FO Fabry-Perot cavities with resonant response at around 150-kHz [7–9], or the ones based on Fiber Bragg Gratings [10]. However, the sensitivity of these sensors is moderate and they show a great dependence on the technology of integration.

Another PD sensing approach for internal installation is based on the interferometric measurement of AE with a single-mode optical fiber as the intrinsic transducer of ultrasounds into optical phase [11,12]. More sensitivity can be achieved with this technique by using long fibers in the sensing arm but the frequency response would be a drawback.

This work is focused on the development, characterization and testing of a fiber optic intrinsic sensor for acoustic detection of PD. It is organized as follows: Section 2 is devoted to the principle of sensing of the FO sensor and the description of the read-out system. The calibration of the sensor is presented in Section 3. Several tests under real conditions are presented in Section 4. These were carried out in a high voltage laboratory where the sensor was tested with PD generated in transformer oil. Finally, the conclusions are included in Section 5.

2. Principle of Sensing and Interferometric Read-Out System

2.1. Sensing Principle

Acoustic emissions are pressure variations in an elastic medium. The principle of sensing of an intrinsic fiber optic acoustic sensor is based on the change in the optical path length produced by the strain induced by the acoustic pressure waves. For an interferometric approach, where the optical phase of the interfering light contains the information of the measured magnitude, the phase of the light (Φ) passing through a piece of optical fiber of longitude L is given by:

$$\phi = \beta L = \frac{2\pi\eta_{\text{eff}}}{\lambda} L \quad (1)$$

where β is the propagation constant, η_{eff} is the effective refractive index of the fiber and λ is the optical wavelength. The change in the phase is then:

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \beta\Delta L + L\Delta\beta \\ &= \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 \end{aligned} \quad (2)$$

The first term in the last expression represents the phase shift due to the axial stretching of the fiber:

$$\Delta\phi_1 = -\frac{\beta L}{E}(1-2\nu)\Delta P \quad (3)$$

where ν is the Poisson ratio, E is the Young modulus and ΔP is the acoustic pressure change.

The second term in Equation (2) is the change of the propagation constant which depends on the change of the refractive index (strain-optic effect) and the fiber diameter produced by the strain. However, the effect of the change on diameter is proved to be negligible [13] so $\Delta\phi_2$ can be written as:

$$\Delta\phi_2 = \frac{\beta L n^2}{2E}(1-2\nu)(p_{11} + 2p_{12})\Delta P \quad (4)$$

where p_{11} and p_{12} are elements of the strain-optic tensor. Substituting Equations (3) and (4) in Equation (2) it is obtained:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi\Delta P} = \frac{(1-2\nu)}{E} \left[\frac{n^2}{2}(p_{11} + 2p_{12}) - 1 \right] \quad (5)$$

the expression $\Delta\Phi/(\Phi\Delta P)$ is known as the normalized acoustic phase responsivity (NR) and it is expressed in Pa^{-1} .

2.2. Design of the Sensor Probe

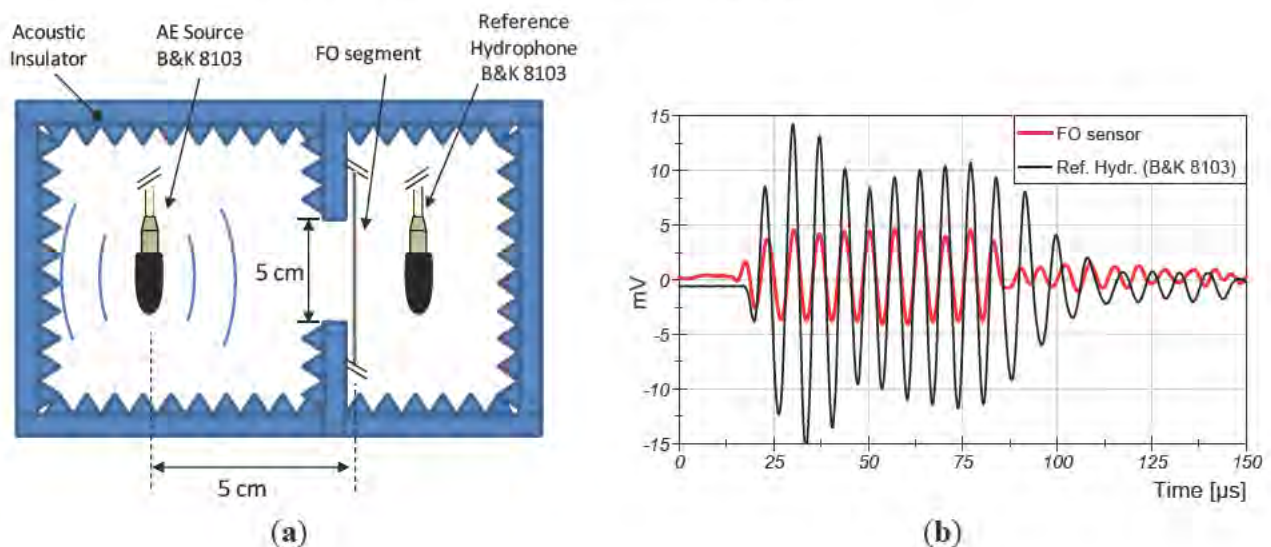
Some specific characteristics of the external ultrasound sensors that are commonly used for PD detection have been taken for the development of the proposed fiber optic sensor: sensitivity of 10 mV/Pa at the frequency of 150 kHz and bandwidth between 100 kHz and 300 kHz [14]. Moreover, PD acoustic emissions are expected in a typical range of 1 Pa to 10 kPa. This makes the interferometric measurement suitable for the application due to the high range-resolution that it is able to achieve. In this case, the most important parameter of design is the resolution (1 Pa). The proposed sensitivity is

like that of an R15i sensor (10 mV/Pa) and corresponds to -180 dB re rad μPa^{-1} (1×10^{-9} rad/ μPa). Under these conditions and assuming a quasi-linear output range of 20 V in the interferometer (stabilized for homodyne detection), the input dynamic range in the system is 2 kPa. These requirements should be appropriate and they are the initial requirements of design.

The sensor design is based on a fiber optic coil in a multilayer configuration which will be exposed to AE. Since the phase sensitivity is inversely proportional to λ , as can be seen in Equation (5), a short optical wavelength (633 nm) single-mode fiber is selected for the construction of the sensor in order to obtain higher phase sensitivity. The fiber used to build the sensor is the model: SCSM-633-HP1, which is a coated fiber with an operating wavelength range of 600–760 nm. A simple calculation of the fiber length that is needed to obtain the desired sensitivity is done using the NR for a typical coated fiber, which is ≈ -330 dB re μPa^{-1} [15], and the optical wavelength of 633 nm aforementioned for the interrogation of the sensor. With these parameters the total optical phase (Equation (1)) in 1 m of fiber corresponds to 143 dB re rad, therefore the sensitivity of the sensor will be -187 dB re rad $\mu\text{Pa}^{-1} \text{m}^{-1}$. It means that 2 m of fiber is needed to obtain the desired sensitivity.

Since the value of NR that is used for the calculation of the sensor fiber length is an approximated value, an experimental measurement was carried out in order to obtain the real value of the responsivity for this fiber. The set up for the test is shown in Figure 1.

Figure 1. (a) Experimental set-up for the measurement of fiber sensitivity; (b) The same AE detected with the FO segment and the calibrated hydrophone.

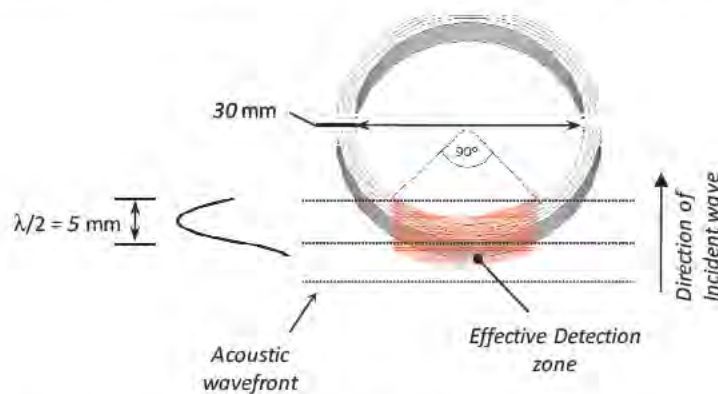


In this experiment a FO segment of 5 cm is immersed in water and a calibrated hydrophone (B&K 8103) is placed at the same distance to the source. This is observed in Figure 1(b): both signals start at the same time. Both are exposed to the same AE of 150-kHz emitted with a transducer placed at 5 cm. Figure 1(a)—the reference hydrophone and the FO segment are separated for clarity. The segment of fiber is interrogated by a Mach-Zhender interferometer with an output range of 12 V. The reference hydrophone has a sensitivity of 200 $\mu\text{V}/\text{Pa}@150$ kHz.

The results of the measured sensitivity are shown in Figure 1b. The AE of 100 Pa is observed in the fiber segment as 1.45×10^{-3} rad. This result shows a responsivity of -190 dB re rad $\mu\text{Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Therefore, the length of fiber needed for the sensor is 3.2 m.

Before the construction of the sensor, a design problem related with the acoustic frequency of interest (150 kHz) and the dimensions of the sensor has to be analyzed. When an acoustic wave of 150 kHz is propagating in the transformer oil (velocity of 1,400 m/s) the acoustic wavelength is ~ 10 mm. The minimum diameter achievable in the coil of conventional fiber is around 30 mm in order to avoid excessive optical losses. Therefore, since the dimensions of the sensor are greater than the desired wavelength, a phase difference of the acoustic field is present across the coil and this causes a reduction of the average pressure onto the sensor. This effect reduces the sensitive zone of the sensor that brings a net contribution free of the averaging effect and it is about 1/4 of the total fiber length of the coil (Figure 2). As a consequence, a fiber length of at least 13 m is needed for the building of the sensor.

Figure 2. Detail of the effective sensitive zone of the sensor at the desired frequency.

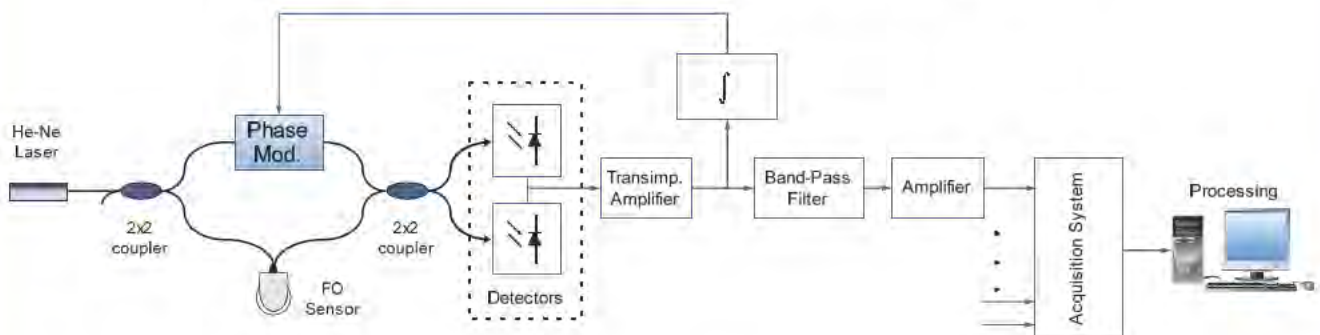


The sensor was made by winding multiple layers of fiber around a former of 30 mm in diameter. The fiber in the coil was 17-m long. This amount of fiber is arranged in five layers of 5 mm of width.

2.3. Interferometric Read-Out System and Electronic Conditioning

In order to prove the sensor, a scheme based on an all-fiber Mach-Zehnder interferometer with homodyne demodulation was used. The block diagram of the implemented optoelectronic instrumentation system is shown in Figure 3.

Figure 3. Diagram of the optoelectronic instrumentation system.



In this scheme a He-Ne (633 nm) laser coherent light source is used to interrogate the sensor. The detection of the optical phase encoded in the intensity output is done through two balanced

photodetectors. Differential transimpedance amplification is used to compensate the effect of the mean optical power onto each photodetector in order to improve the performance with a DC null configuration. A homodyne demodulation is used to set the interferometer operating point at the maximum sensitivity and in the middle of the quasi-linear output range ($-\pi/4$ rad to $\pi/4$ rad). It is done by a feedback loop that integrates the error signal and actuates through a phase modulator which is connected to the fiber reference arm to compensate the temperature drift and other low frequency disturbances on the interferometer. The phase modulator implemented here is able to compensate up to 50π rad at frequencies below 200 Hz. Moreover, a control of the optic polarization has been included in order to avoid the interference signal fading.

Once the optical phase is converted into a voltage signal, it is conditioned through a band-pass filtering stage with a resonance frequency of 150 kHz in order to adjust the bandwidth of the FO sensor to the acoustic PD emissions. It equalizes the frequency response obtained with the sensing probe, as well as it attenuates the disturbances that are produced by other acoustic sources in the transformers (such as the Barkhausen noise [14]).

The stabilized interferometer has a voltage output proportional to the optical phase change given by:

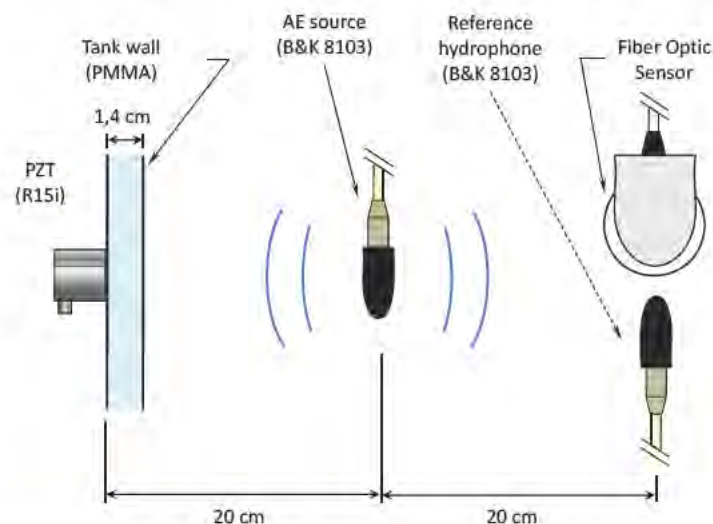
$$V_s = 2I_0 \Delta\phi R \eta G_T G_F \quad (6)$$

where I_0 is the mean optical power at each photo-detector, R is the responsivity of the photo-detectors, η is a factor between 0 and 1 that is determined by the contrast of the interference (in this case 0.6). G_T and G_F are the transimpedance gain and the band-pass filter gain respectively.

3. Calibration of the Sensor

The calibration of the sensor was carried out in an acoustic test bench in water (Figure 4). In this scenario the AE produced by PD can be reproduced, but without high voltage elements present in the set-up. This provides a controlled and safety environment for the calibration. The test bench includes an immersed calibrated hydrophone (Brüel & Kjaer 8103) and an external sensor (model: R15i-AST), which is commonly used in acoustic PD detection, mounted on the wall of the tank. The generation of the acoustic emission is done by using a transducer identical to the reference hydrophone.

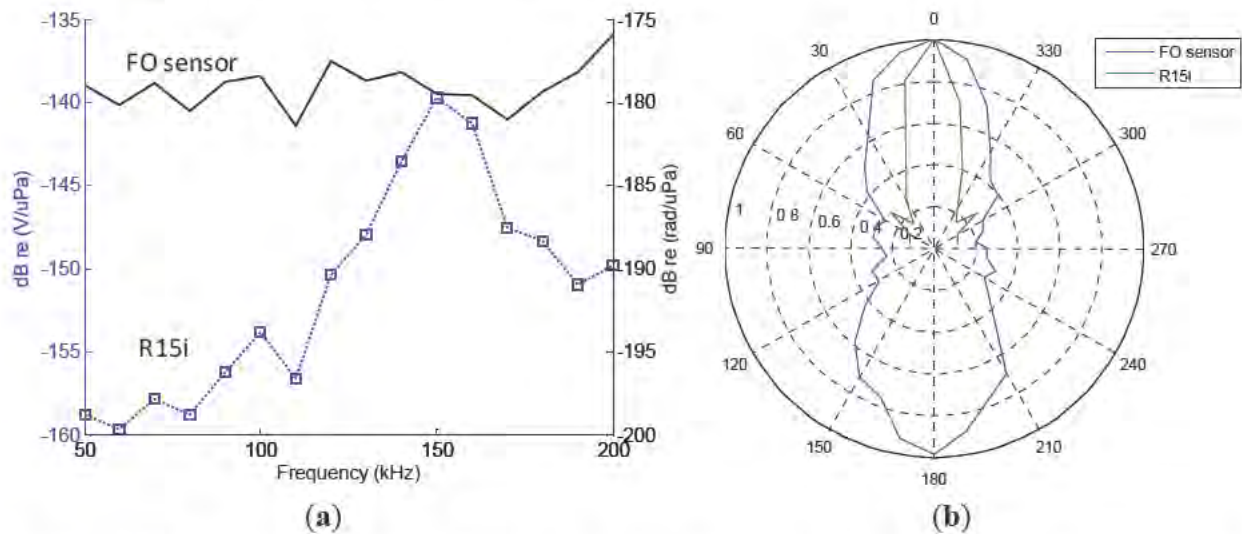
Figure 4. Experimental set-up for the calibration of the sensor in water.



3.1. Frequency Response of the Sensor and Sensitivity at 150 kHz

A comparative analysis of the frequency response between the internal FO sensor and the external R15i sensor was done in order to evaluate if the bandwidth of the fiber optic sensor is suitable for the application. In this test, a frequency sweep was applied from 50 kHz to 200 kHz: in the range of frequencies in which the hydrophone is calibrated. The results are shown in Figure 5(a).

Figure 5. (a) Frequency response of the FO sensor; (b) Comparative analysis of the directivity of the external sensor and the fiber optic internal sensor at 150-kHz.



The sensitivity obtained for the FO sensor at 150-kHz was 1.1 mrad/Pa (11 mV/Pa for 20-V output range in the interferometer). Moreover it has broader bandwidth (100 kHz–300 kHz were observed with a flat response). This is useful for PD identification because part of the emitted acoustic energy is found in that portion of the spectrum. The resultant noise equivalent bandwidth of the sensor is a drawback in this case.

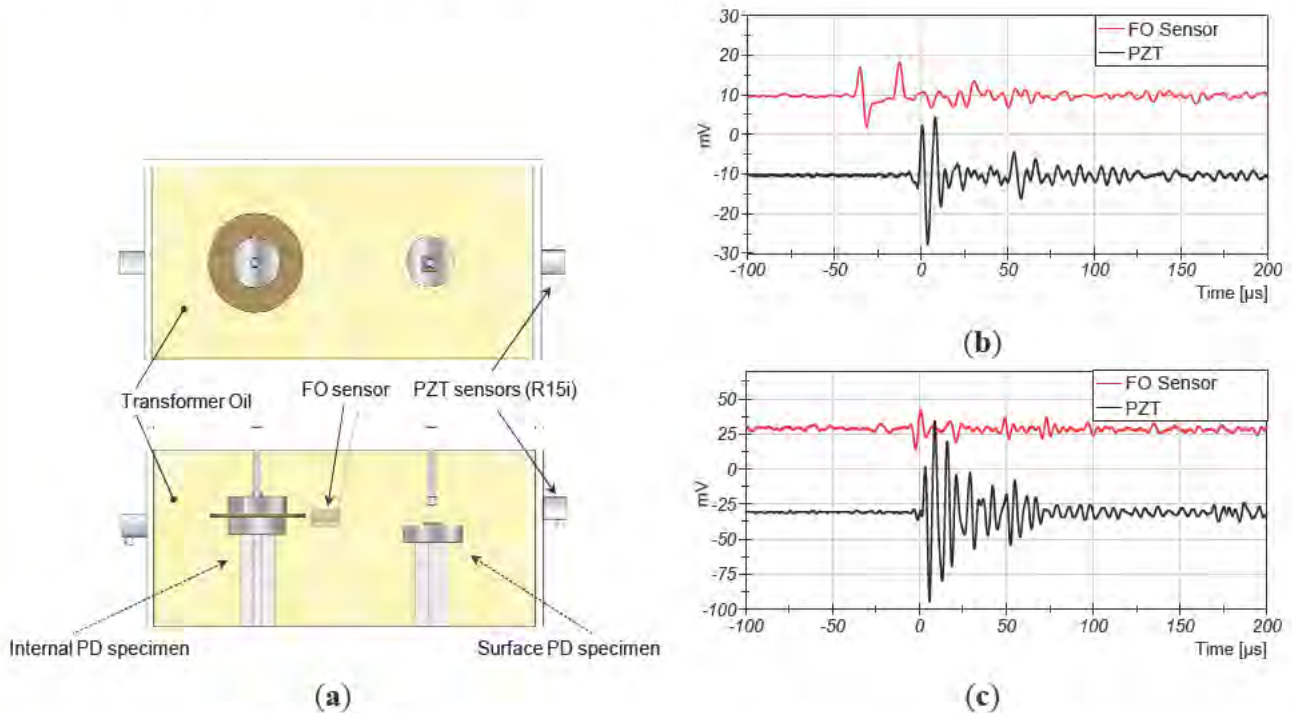
3.2. Directionality

The directional characteristics were characterized at 150-kHz and the results are shown in Figure 5(b). A wider detection field was found in the FO sensor. The directivity span is approximately $\pm 30^\circ$ compared to $\pm 15^\circ$ of the external sensor R15i. This result shows an advantage for PD detection with FO sensors over conventional external detection because wide zones should be inspected in large transformers.

4. Testing the Fiber Optic Sensor with PD Generated in Transformer Oil

A four layer sensor was manufactured and tested with real PD generated in transformer oil in order to test its performance in real conditions. In this test bench PD are generated with high voltage electrodes immersed in oil. Two different types were generated in order to produce representative PD: plane-plane electrodes for internal PD and needle-plane electrodes for surface PD (Figure 6(a)).

Figure 6. (a) High-voltage test bench of PD generation in oil; (b) Average of eight signals detected for internal PD; (c) Signals detected for surface PD.



The set-up was configured to detect with two sensors, internal (FO sensor) and external (R15i), at the same time. The FO sensor was located at 9 cm and 15 cm from the internal PD source and the surface PD source, respectively. The external sensor was located at 15 cm from the source in both cases.

The results of the tests are shown in Figure 6(b,c). The FO sensor shows suitable sensitivity to detect the acoustic emission of PD in both cases. The amplitude of the detected acoustic emissions is about ~ 1.3 Pa. Different waveforms are detected by the two sensors because their different frequency response. The broader bandwidth of the FO sensor produces shorter transient response than the PZT.

In addition, two peaks are detected by the FO sensor, which are delayed 23 μ s. In this experiment, the acoustic absorber is removed from the middle of the coil. Therefore, the AE is detected by the first sensitive face and it travels to the second sensitive face where is also detected with a delay.

Based on previous works, if bare fiber is exposed for long time periods to the conditions inside transformers, it becomes tinted with the color of the oil. However, optical fibers withstand harsh environments and do not show permanent changes of the optical transmission and of the elasto-optic properties [16–18]. Hard coatings such as Teflon give better acoustic sensitivity, flat frequency response and thermal drift desensitization. Soft coatings such as acrylate based elastomers have narrower band-pass sensitivity to ultrasounds, which is desirable in transformers.

5. Conclusions

A fiber optic sensor for PD detection in transformer oil has been developed. It has been characterized in an acoustic test bench in water and also tested with real PD generated in oil. In the characterization a sensitivity of 1.1 m rad/Pa at 150-kHz (11 mV/Pa with 20 V of range at interferometer output) and a wider detection field ($\pm 30^\circ$) compared with an external sensor ($\pm 15^\circ$) has been shown. The test of the

sensor with real PD shows that it has suitable sensitivity and enough resolution to detect acoustic pressure as low as 1.3 Pa.

It is a cost-effective solution compared with other fiber optic sensors which can also be immersed in oil. It offers the possibility of a multichannel configuration for an easy deployment of several sensors to locate the source of partial discharges through the time of flight of the acoustic emissions.

The optoelectronic scheme with homodyne demodulation that is used for the characterization of the FO sensor is practical for one channel application. However, a new optical interrogation scheme is needed for the implementation of multiple internal sensors (at least four) to locate the PD source. A heterodyne interferometer is proposed, which is able to drive multiple channels. With this technique, measurements with improved signal to noise ratio are expected because the measuring signal modulates a high frequency carrier.

Further work will be focused on the stability of the optical fiber sensor head and the AE sensitivity drift in controlled conditions of oil immersion and accelerated aging that emulates the exposition to the transformer environment for long time periods.

Acknowledgments

This work was supported by the Spanish National Ministry of Science and Innovation, under the R&D project No. DPI 2009-14628-C03-01. PD tests have been made in collaboration with the LINEALT of University Carlos III de Madrid.

References

1. Wang, Y.; Gong, S.; Grzybowski, S. Reliability evaluation method for oil-paper insulation in power transformers. *Energies* **2011**, *4*, 1362–1375.
2. Wang, M.; Vandermaar, A.J.; Srivastava, K.D. Review of condition assessment of power transformers in service. *IEEE Electr. Insul. Mag.* **2002**, *18*, 12–25.
3. Stone, G.C. Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2005**, *12*, 891–903.
4. Lundgaard, L.E. Partial discharge-part XIII: Acoustic partial discharge detection—Fundamental considerations. *IEEE Electr. Insul. Mag.* **1992**, *8*, 25–31.
5. Judd, M.D. Experience with UHF partial discharge detection and location in power transformers. In *Proceedings of the Electrical Insulation Conference (EIC)*, Annapolis, MD, USA, 5–8 June 2011; pp. 201–205.
6. Judd, M.D.; Hunter, I.B.B. Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors. Part 2: Field experience. *IEEE Electr. Insul. Mag.* **2005**, *21*, 5–13.
7. Yu, B.; Kim, D.W.; Deng, J.; Xiao, H.; Wang, A. Fiber fabry-perot sensors for detection of partial discharges in power transformers. *Appl. Opt.* **2003**, *42*, 3241–3250.
8. Dong, B.; Han, M.; Sun, L.; Wang, J.; Wang, Y.; Wang, A. Sulfur hexafluoride-filled extrinsic Fabry-Pérot interferometric fiber-optic sensors for partial discharge detection in transformers. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2008**, *20*, 1566–1568.

9. Wang, X.; Li, B.; Xiao, Z.; Lee, S. H.; Roman, H.; Russo, O. L.; Chin, K. K.; Farmer, K. R. An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection. *J. Micromech. Microengineering* **2005**, *15*, 521–527.
10. Lima, S.E.U.; Frazão, O.; Farias, R. G.; Araújo, F. M.; Ferreira, L. A.; Santos, J. L.; Miranda, V. Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges—A proof of concept. *IEEE Trans. Power Deliv.* **2010**, *25*, 2526–2534.
11. Zhiqiang, Z.; Macalpine, M.; Demokan, M.S. The directionality of an optical fiber high-frequency acoustic sensor for partial discharge detection and location. *J. Lightwave Technol.* **2000**, *18*, 795–806.
12. Macià, C.; Lamela Rivera, H.; Garcia-souto, J.A. Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power transformers. *J. Opt. A* **2003**, *5*, 66–72.
13. Wild, G.; Hinckley, S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art. *IEEE Sens. J.* **2008**, *8*, 1184–1193.
14. IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors. IEEE Std C57.127TM-2007, 31 August 2007.
15. Kirkendall, C.K.; Dandridge, A. Overview of high performance fibre-optic sensing. *J. Phys. D* **2004**, *37*, 197–216.
16. Lamela Rivera, H.; Garcia-Souto, J.A.; Sanz, J. Measurements of mechanical vibrations at magnetic cores of power transformers with fiber-optic interferometric intrinsic sensor. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **2000**, *6*, 788–797.
17. Biswas, D.R. Aging behavior of polyimide/acrylate-coated optical fibers in harsh environments. *Opt. Eng.* **1997**, *36*, 2169–2170.
18. Tae-Young, K.; Jong-Eun, K.; Kwang, S. On-line monitoring of transformer oil degradation based on fiber optic sensors. *Sens. Mater.* **2008**, *20*, 201–209.

© 2012 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

4 Multichannel Fiber Optic Heterodyne Interferometer

**2nd Major
Original Contribution**

Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer for
ultrasound detection of partial discharges in power
Transformers

Meas. Sci. Technol. **2013**, 24, 094015 (9pp)

4 The multichannel fiber optic heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in transformers

The design of the multichannel system is based on a fiber-optic Mach-Zehnder heterodyne interferometer with multiple sensing arms in a parallel configuration and a common reference arm (a simplified scheme was shown in Fig. 1) [44]. The description and the characterization of this system are reported in the full paper [45], which is attached below. A Diode-Pumped Solid-State laser (DPSS) of short-wavelength (532nm) is used to illuminate the FO system. DPSS lasers are compact, low cost and provide enough optical power to illuminate the 4-channels of the FO system, but maintaining characteristics such as coherence and low phase noise, which are essential to achieve the high performance necessary to detect the low amplitude AE generated by PD [46]–[49].

The heterodyning is achieved when the shifted optical frequency of the reference beam is combined with the light coming from the FO sensors. The optical frequency shift is done by means of an acousto-optic modulator. This approach enables the encoding of the measurement in the phase of a carrier signal. The demodulation is done using a digital I/Q demodulator implemented in LabVIEW. Both together, the heterodyne approach and the digital demodulation, enabled an extended measurement range of about 17 kPa_{rms} at 150 kHz (Range/resolution > 10⁴) and a simplified implementation of even more channels due to the software scalability.

In the attached paper, first, the principle of sensing and the heterodyne detection are presented. Second, the multichannel interferometer scheme and its characterization are reported. It was demonstrated for an implementation of four channels in which the best resolution limited by the 12-bit DAQ system was achieved (1 Pa), which improves the values reported in [45]. Finally, several tests were performed in the acoustic characterization laboratory to demonstrate experimentally the capability of detecting the AE with 4 channels simultaneously and also for measuring the TOA to each sensor, which are the bases for the localization of the AE sources. In addition, related to the monitoring of power transformers, a specific configuration of internal placement of the FO sensors was proposed.

Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in power transformers

J E Posada, J A Garcia-Souto and J Rubio-Serrano

Optoelectronics and Laser Technology Group, Department of Electronics Technology, Universidad Carlos III de Madrid, Av. Universidad 30, E-28911 Leganés (Madrid)—Spain

E-mail: jposada@ing.uc3m.es and jsouto@ing.uc3m.es

Received 31 December 2012, in final form 5 April 2013

Published 24 July 2013

Online at stacks.iop.org/MST/24/094015

Abstract

A multichannel interferometric system is proposed for the ultrasonic detection of partial discharges using intrinsic optical fibre sensors that may be immersed in oil. It is based on a heterodyne scheme which drives at least four sensor heads in order to localize the source of the acoustic emissions. Proper design of the sensing head improves its sensitivity through magnification and reaches a compact encapsulated probe able to be installed within power transformers. The optoelectronic implementation and the experimental tests are presented to optimize the resolution (4 channels—4 mrad). In addition, the results of ultrasound measurements at 150 kHz with an optical fibre sensor immersed in water in an acoustic test bench are shown, in which a resolution better than 10 Pa was obtained. Finally, the set-up for three-phase power transformers is demonstrated and characterized to detect and locate the source of acoustic emissions.

Keywords: optical fibre sensors, multichannel measurements, heterodyne interferometer, acoustic emissions, ultrasound, partial discharges, harsh environments, power transformers

(Some figure may appear in colour only in the online journal)

1. Introduction

Acoustic detection of partial discharges (PD) is a widely used technique for the diagnosis of power transformers [1]. This technique uses the detection of ultrasound acoustic emissions (AE) produced by PD to detect and locate incipient faults in the transformers' insulation system. Optical-fibre (OF) sensing offers great benefit in these environments of harsh conditions (high electric and magnetic field and a large range of temperatures), even for the installation inside the apparatus maintaining the conditions of isolation.

PD location is based on detection with multiple sensors that provide information about the time of arrival (TOA) of the AE. Then the source of AE is localized with the aid of standard techniques such as triangulation [2–3]. In the acoustic detection of PD, external piezoelectric sensors placed on the walls of the transformer tank are commonly used. In addition, new sensors based on optical interferometry have been developed for internal installation [4–6]. These are

more sensitive because they are closer to the AE source and overcome the problems associated with the electrical noise in harsh environments.

An internal interferometric OF sensor for the ultrasound detection of PD at 150 kHz was previously reported [7]. It was tested with a single channel optoelectronic read-out unit (all-fibre interferometer with homodyne demodulation). However in the future it is desirable to implement a PD detection system which can handle a minimum number of four of these acoustic OF sensors in order to locate PD sources. A new design of the interferometric scheme is proposed for this type of sensor in order to address a multichannel configuration but maintaining the high performance necessary to detect the low amplitude acoustic signals emitted by PD.

In this paper we propose a multichannel heterodyne interferometer for the detection of PD with intrinsic OF sensors, which is able to handle four channels simultaneously. The system is tested in order to determine the resolution that can be achieved. Moreover, all channels were tested with AE

Table 1. Characteristics of the OF sensing head for PD detection.

Total fibr length	21 m (including lead-in/out)
Winding length	17 m
Coil diameter	30 mm
Number of layers	5
Detection bandwidth	100 kHz–300 kHz
Sensitivity	1.3 mrad Pa ⁻¹
Detection angle	± 30°

similar to PD by products with one OF sensor head. Both confir the feasibility of the new OF interferometric design that overcomes the limitations of other approaches. Finally, the set-up for three-phase power transformers is implemented and characterized in order to detect and locate the source of acoustic emissions.

The paper is organized as follows. Section 2 is devoted to the principle of ultrasound detection and the basis of the enhanced sensitivity sensing and the heterodyne interference output. The design and implementation of the multichannel OF heterodyne interferometer are presented in section 3. In section 4 the characterization set-ups of the multichannel interferometer are described together with laboratory tests. Experimental results and a comparative analysis are also included here. They are focused on the resolution of the system and the acoustic detection with all channels. The implementation of the set-up oriented to monitoring inside a three-phase power transformer is presented in section 5. The experimental results include detection and location of the source of acoustic emission. Finally, there is a discussion of our conclusions in section 6.

2. Principle of sensing and heterodyne detection

Acoustic emissions are pressure variations in an elastic medium of propagation, such as oil or water, which can be coupled to an elastic sensing material such as an optical fibre. In this case intrinsic sensing is based on the change of the optical path length produced by the acoustically induced strain. This is measured by optical phase means in an interferometer [8]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nl}{\lambda} \frac{(1 - 2\nu)}{E} \left(\frac{n^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) - 1 \right) \Delta P \quad (1)$$

where n is the effective refractive index of the fibr and λ is the optical wavelength, ν is the Poisson ratio, E is the Young modulus, p_{11} and p_{12} are elements of the strain-optic tensor and ΔP is the acoustic pressure change. Both axial stretching of the fibr and strain-optic effect are considered contributions to the optical phase shift. Some characteristics of the OF sensor of PD that was previously developed under this principle are summarized in table 1.

The sensor design is based on an OF coil in a multilayer configuratio which will be exposed to AE. According to (1) more sensitivity is obtained by exposing a longer section of fibr to the AE ($\Delta\phi / \Delta P \propto l$). In order to obtain a compact design of moderate size, the sensor head is a coil of fibr and multiple layers of fibr are stacked. If the dimensions of the sensor are far lower than the AE wavelength, then all the

fibr length exposed to the AE contributes to the sensitivity. However, the minimum bending radius of the fibr limits the coil diameter. Therefore the improvement of sensitivity by the fibr length and the compact design to avoid loss of sensitivity is a trade-off question. In practice, the coil is built by winding 17 m of fibr on a cylindrical mandrel of 30 mm in diameter, which is removed after the coiling process (figur 1). Five layers were used for this design.

Experimental evaluation of sensitivity showed a reduction in a factor of 1/4. This is due to the average of the acoustic fiel over the sensor (figur 1); thus the net contribution is equivalent to those of $l/4$ length of the exposed fibre. In this case the minimum dimensions of the sensor are greater than the desired wavelength (figur 1) for the acoustic frequency of interest, that is 150 kHz ($\lambda/2 = 5$ mm). The net contribution of the fibr coil to the AE sensitivity with respect to a specifi AE source is a combination of the following: (i) the front face section that is the main contribution to the sensitivity, (ii) the intermediate sections whose contributions are negligible and (iii) the back face section that also contributes to the sensitivity, but is observed as a delayed response, similar to the effect that can be observed as ringing [7].

Two techniques are considered for the interferometric read-out of the aforementioned intrinsic OF sensor of PD: homodyne and heterodyne. The homodyne technique is based on the interference of two light beams of equal frequency. With this technique the ultrasound AE is encoded in the amplitude of the photocurrent detected at the output of the interferometer:

$$i_{pd} = K \cdot \cos(\phi_o + \Delta\phi) \quad (2)$$

where K is a constant that contains the mean optical power on the detector, the responsivity of the photodetector and the contrast of the interferometric signal (visibility). ϕ_o is the initial optical phase introduced by the imbalance between the interferometer arms and $\Delta\phi$ is the optical phase change described in (1) which contains the information of interest.

On the other hand, in the heterodyne technique, two beams of different frequencies are interfering and the ultrasound AE is encoded in the phase of the photocurrent signal detected at the output of the interferometer. In both techniques the ultrasounds are modulating a carrier signal, so an adequate demodulation must be applied to the carrier in order to obtain information of interest. The photocurrent of the detector at the output of the heterodyne interferometer is given by

$$i_{pd} = K \cdot \cos(2\pi f_c + \phi_o + \Delta\phi) \quad (3)$$

where K , ϕ_o and $\Delta\phi$ are the same parameters described before in (2) and f_c is the frequency of an electronic carrier signal which is modulated by the optical phase. In the heterodyne technique, the carrier is usually a radiofrequency (RF) in the HF or VHF band, while the homodyne technique uses a low frequency which makes its implementation easier. However, the homodyne technique needs a phase modulator (typically piezoelectric actuators) in order to set the bias point of the interferometer in the quasi linear range, so a multiple channel system needs multiple modulators (one per channel), making its implementation unfeasible [9]. The heterodyne technique, though more complex, is feasible in a multiple

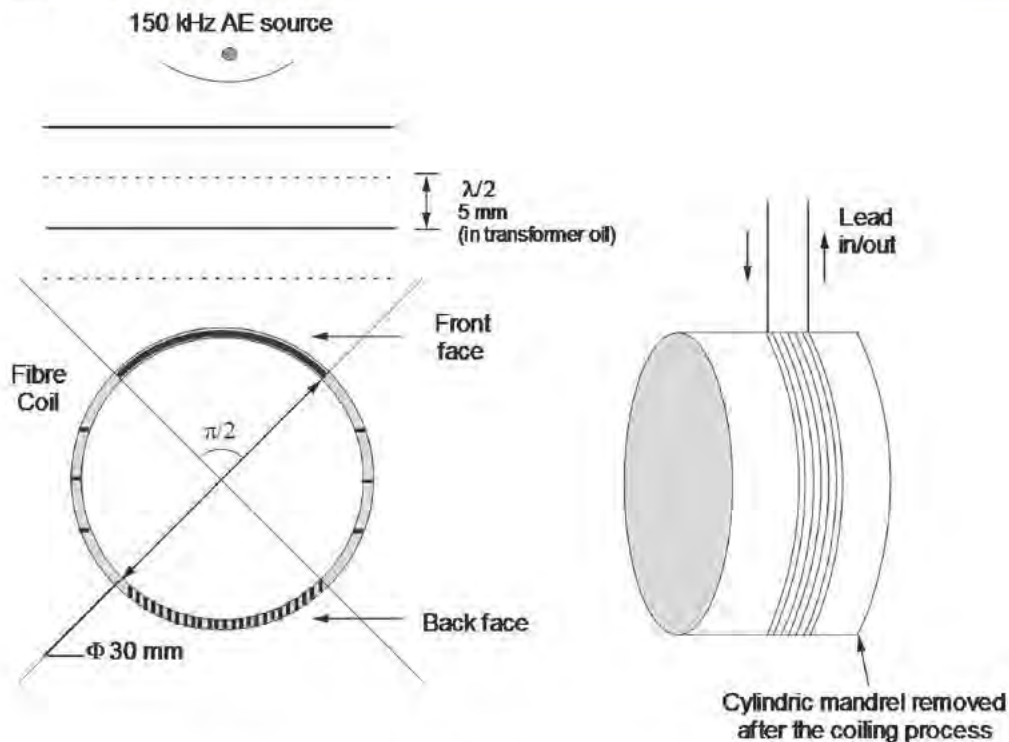


Figure 1. Optical fibre probe for the detection of AE of 150 kHz.

channel implementation because no additional components are needed in each channel [10]. Moreover, since the measurement is encoded in the phase of a high-frequency carrier it is not affected by flicker noise ($1/f$ noise) which leads to a high-resolution measurement.

3. Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer

Figure 2 shows the proposed interferometric system for the interrogation of four OF sensors.

In the proposed scheme the frequency shift is done by an acousto-optic modulator (AOM). This device (figure 2(b)) provides a beam with a frequency $f_0 + f_1$ (first order) and another beam at f_0 (zero order). The modulation frequency f_1 (80 MHz) applied to the AOM is provided by a frequency synthesizer model AD9954. The AOM used for this laboratory test is a free space model, so the output beams are coupled into the fibres using microscope lenses (figure 2(c)).

For the implementation of the four channel system several 2×2 couplers are used to split the optical power (figure 2(d)) from the 532 nm laser source (figure 2(a)) into one reference arm and several sensing arms. Seven couplers (figure 2(f)) combine the optical signal from each sensing arm with the reference of the interferometer in order to obtain the interferometric outputs of the four channels. These signals are detected by four balanced photodetectors (figure 2(g)) obtaining a phase modulated 80 MHz carrier at their outputs. The carrier is shifted to an intermediate frequency (IF) of 4.8 MHz, which is done by mixing the carrier with a signal of 75.2 MHz generated by the same frequency synthesizer (figure 2(h)). The IF is digitized and demodulated digitally.

The digitization of the IF carrier signal is done using a PXI-5105 system (figure 2(i)), which is able to acquire up to eight signals at 60 MSPS. Once digitized, the information of the phase is extracted from the carrier using a digital quadrature demodulator implemented in LabVIEW.

4. Characterization of the multichannel interferometer

4.1. Resolution of the system

A quadrature demodulator, like the implemented one, has a resolution proportional to the signal to noise ratio (SNR) of the digitized carrier signal. Taking the sensitivity of the OF sensor in table 1 (1.3 mrad Pa^{-1}) and the acoustic pressure resolution target (1 Pa), a SNR of 37 dB is needed ($2\pi \text{ rad}/1.3 \text{ mrad}$).

Figure 3 shows the typical power spectral density (PSD) of the carrier detected from one channel of the interferometer.

Taking the spectrum of the carrier signal shown in figure 3 and integrating the noise present in the detection bandwidth, which is 1 MHz around the frequency of the carrier, the SNR obtained is $\sim 32 \text{ dB}$. This is 5 dB worse than the target. With this SNR the phase resolution is 4 mrad (equivalent AE resolution of 3 Pa with the PD optical-fibre sensor). A degradation of the resolution was observed with the number of channels. Since a free-space AOM was used in this test, the optical insertion losses are considerable (figure 2(c)) which affects the SNR of the overall system. A future implementation will be done with a pigtailed AOM device in order to minimize the insertion losses.

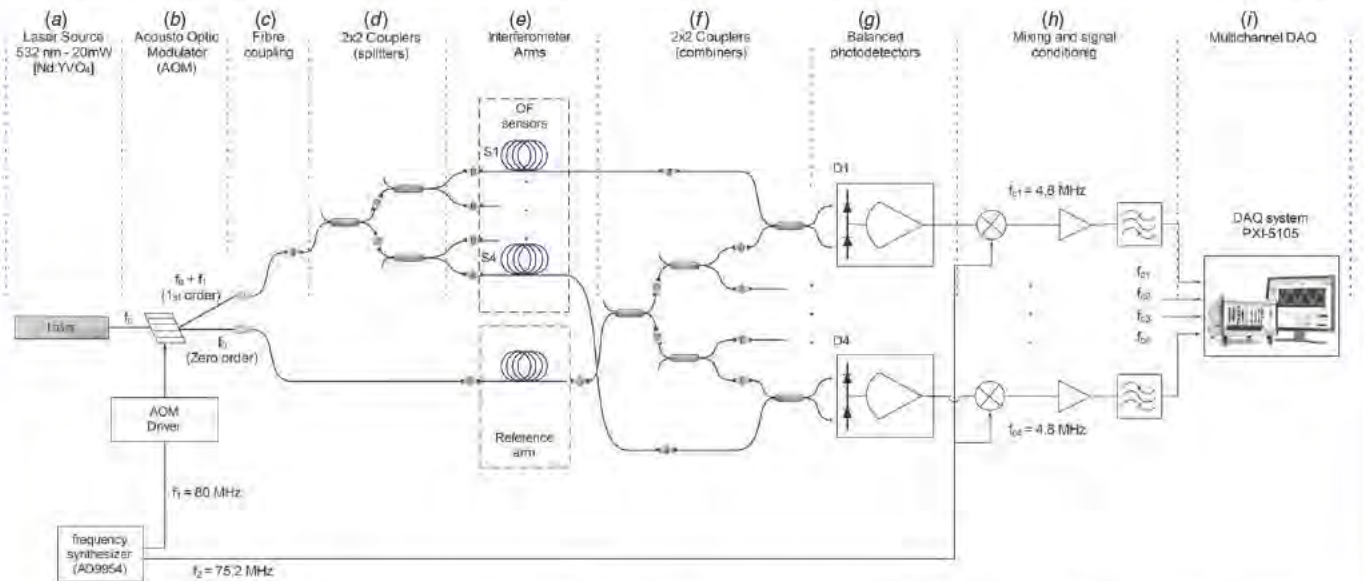


Figure 2. Multichannel interferometric scheme: (a) laser source, (b) acousto-optic modulator and coupling into the fibre, (c) microscope lenses, (d) 2×2 couplers: to split beams, (e) interferometer arms—OF sensors and reference arms, (f) 2×2 couplers: combine beams in order to obtain interference signals, (g) balanced photodetectors, (h) mixers—downconversion stage, (i) multichannel acquisition system.

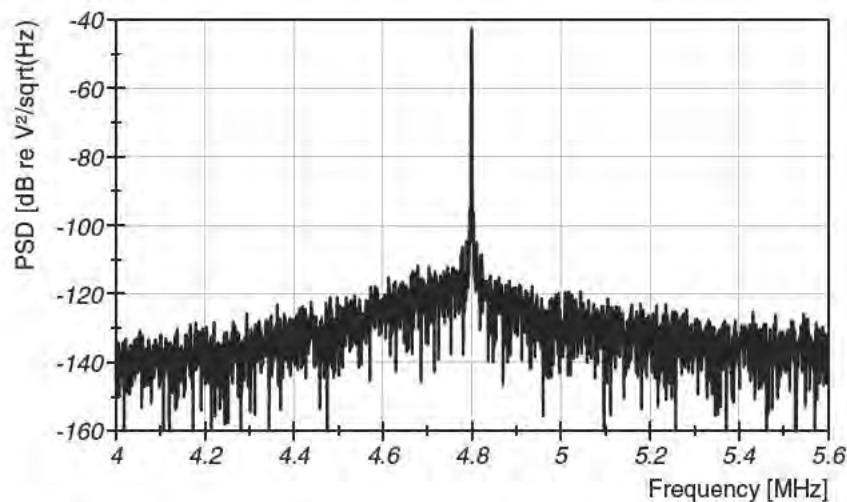


Figure 3. Typical PSD of the carrier detected in each channel of the heterodyne interferometer.

4.2. Acoustic emission detection

The proposed multichannel interferometric system is designed to work with a OF sensing head that was previously characterized immersed in water in an acoustic test bench [7]. The same test bench is used here to characterize the multichannel system. This experimental arrangement is composed of a tank with dimensions 100 cm \times 60 cm \times 60 cm, filled with water in which ultrasounds can be generated in order to emulate the AE generated by PD using a PZT transducer as the AE source. The internal faces of the tank walls are covered with an acoustic absorber in order to avoid reflections of the AE that can disturb these experiments.

Moreover, a calibrated hydrophone (Brüel & Kjaær 8103) is placed near the OF sensor as a reference sensor. The experimental set-up is shown in figure 4(a).

In this test, AE bursts of 150 kHz were generated inside the tank and detected simultaneously with the OF sensor and the reference hydrophone. Both were located at 15 cm in front of the acoustic source. This procedure was carried out for each channel of the interferometer. Figure 4(b) shows the signals that were obtained for all channels with the same OF sensing probe and compared with that detected by the reference hydrophone.

It can be seen in figure 4(b) that the same AE signal detected with the reference hydrophone has a different shape compared to one detected using the OF probe. There are two peaks in the signal detected with the OF probe that appear as a double response with delay. This is due to the symmetry of the fibre coil that presents two sensitive faces, one at each side, thus it detects the same AE twice (see figure 1). This effect of double response could be avoided by insulating one side of

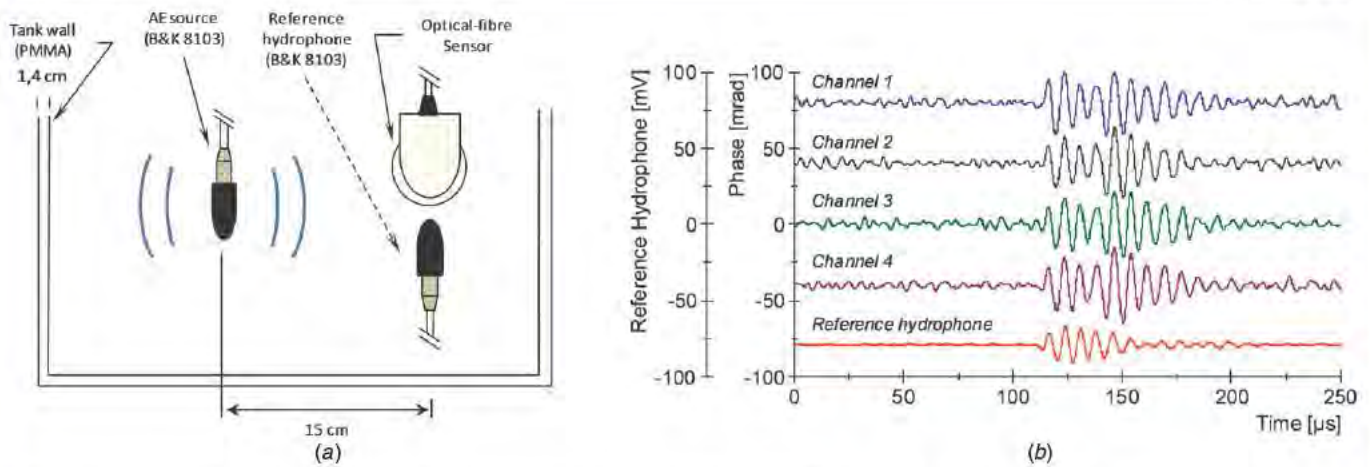


Figure 4. (a) Experimental set-up used in the characterization and (b) AE of 150 kHz detected with the same OF sensing head in each channel.

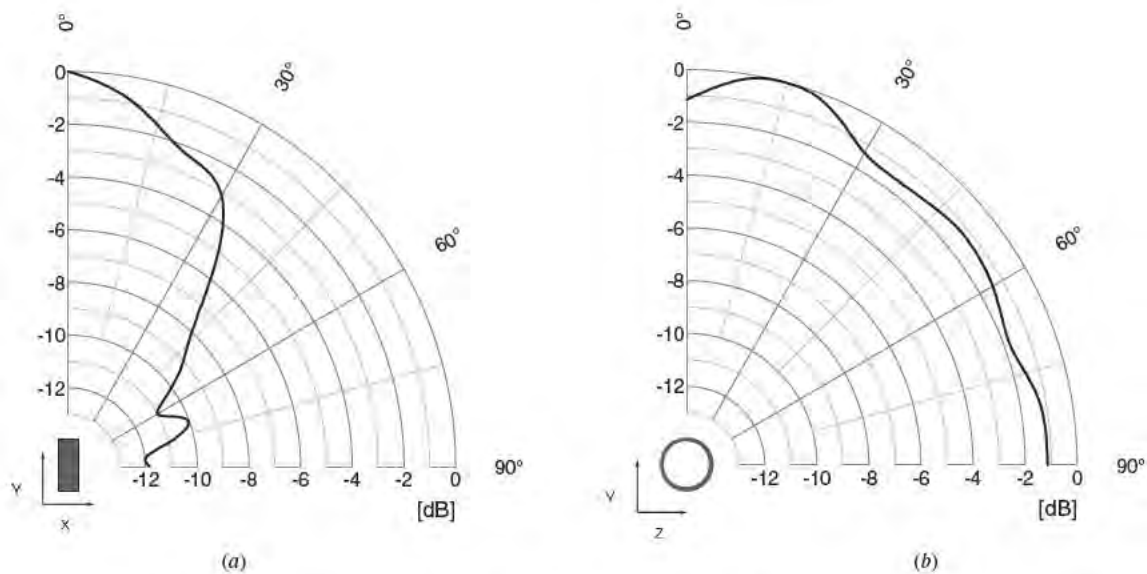


Figure 5. Directivity of the OF ultrasound sensor in the x - y plane (a) and y - z plane (b).

the fibre coil, as will be presented in the experimental results in section 5.

5. Implementation and experimental results

One of the objectives of this project is to implement a sensor arrangement inside a transformer for its online monitoring using the acoustic detection of partial discharges. In this section, a configuration is proposed for the internal placing of the sensors inside a transformer tank and it is tested.

Figure 5 shows the directive pattern of the OF sensor at 150 kHz in the x - y and y - z planes. It can be seen that the detection angle is $\pm 30^\circ$ in the x - y plane and it has a wide detection angle in the y - z plane which covers $\pm 90^\circ$ (figure 5(b)).

The proposed configuration for the internal placement of the OF sensors exploits their wide detection angle in the y - z plane. One complete side of a winding can be monitored by one sensor (figure 6). Six sensors would be required to monitor the windings of the three phases of a transformer. In addition,

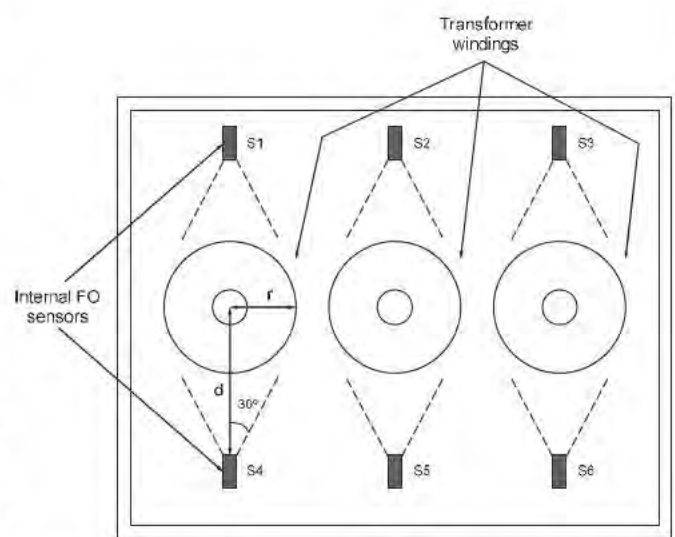


Figure 6. Proposed configuration of the OF sensors internal placement for transformers monitoring.

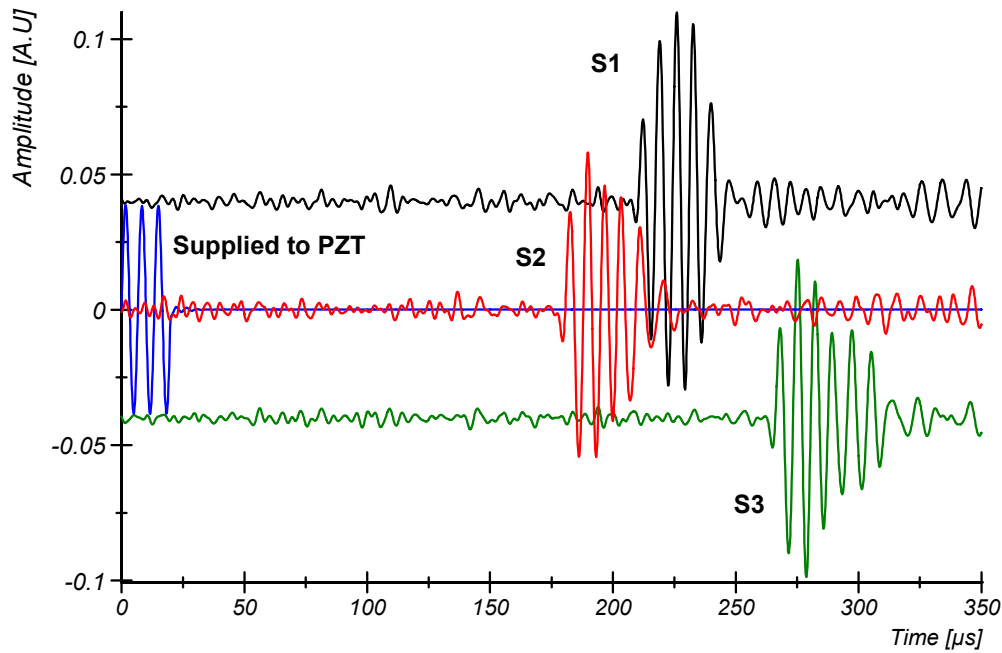


Figure 7. Emulated PD acoustic emission and the detection with three OF sensors in the experimental test bench.

the sensors are placed such that the windings are within the detection angle in the x - y plane. Therefore, the placement of the sensors satisfies the condition $r/d < \tan(30^\circ)$, where r is the winding radius and d is the distance from the centre of the winding to the sensor. This is shown in figure 6.

In order to prove the proposed configuration of the sensors placement, several experimental tests have been carried out. A transformer tank in which the internal OF sensors are immersed in water instead of oil is emulated by using the same acoustic test bench for the characterization of the multichannel system. As mentioned before, with this configuration six sensors are needed for monitoring the three windings of the transformer. However, both sides of the tank have specular symmetry, so three sensors are enough to prove the concept, which simplifies the experimental set-up. A piezoelectric transducer (Brüel & Kjaer Model: 8103) is used to generate ultrasound AE that emulates the AE produced from PD. Figure 7 shows an example of the acoustic signals generated within the test bench and detected simultaneously with three OF sensors. Their characteristics are similar to those of the AE observed in field experiments with real PD generated within transformer oil by means of two electrodes connected to a high voltage [11]. The electrical signal supplied to the PZT transducer used as the AE source is also shown in figure 7. This signal is a burst that contains four cycles of a 150 kHz sinusoidal wave. In contrast to the double peak envelope of the signals shown in section 4.2 (figure 4(b)), the AE detected in this case with each OF sensor has a simple response (front face detection) because the back face of the sensor is isolated by means of an acoustic absorber that is placed in the middle of the fibre coil. The different TOA from the source to the three OF sensors can be noted.

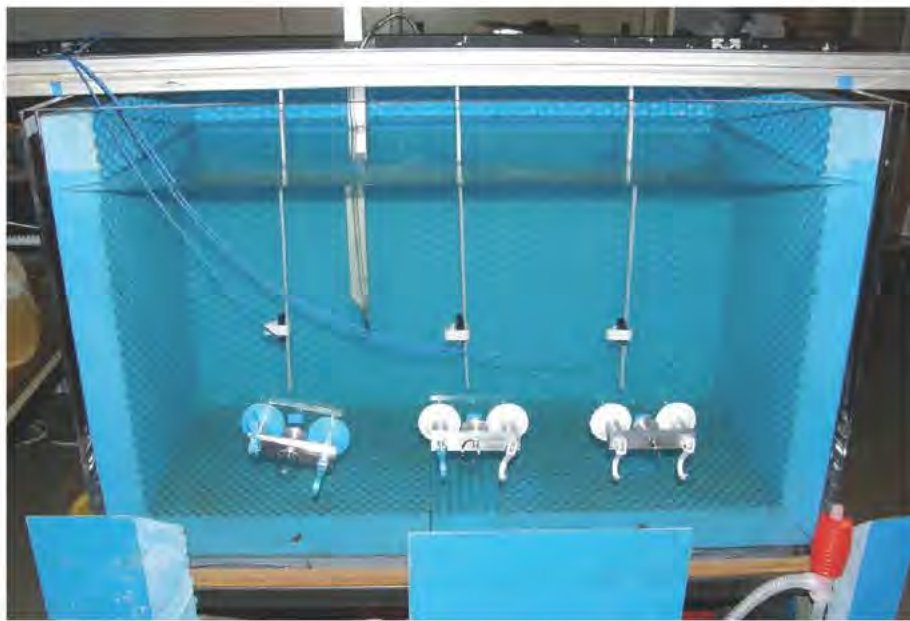
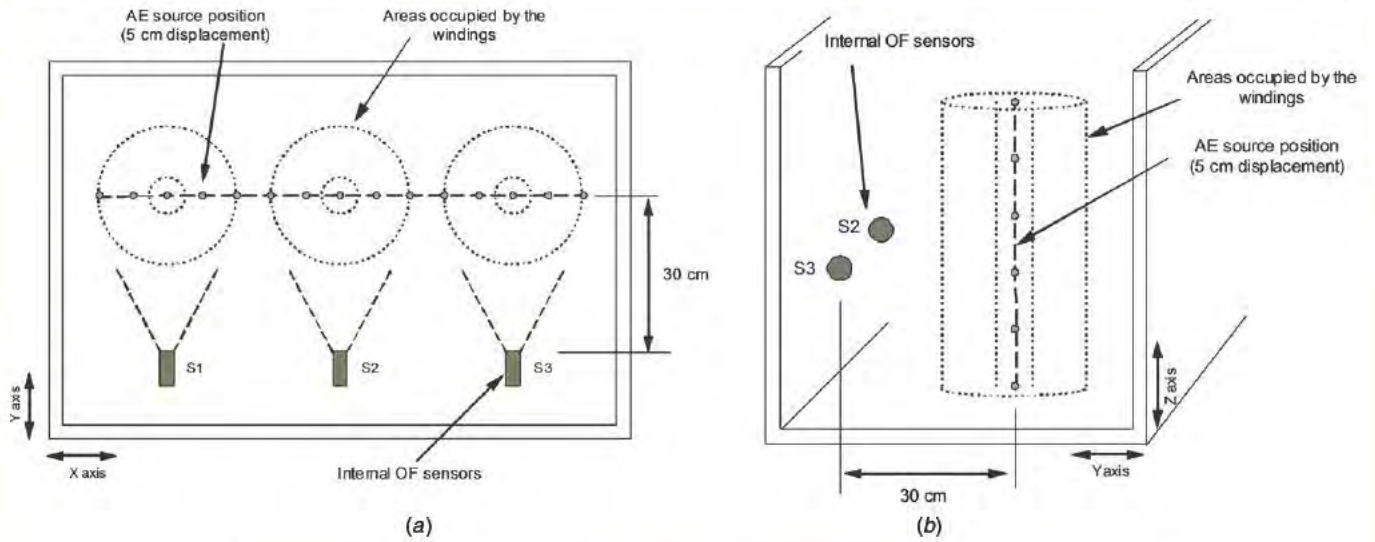
The tests carried out are basically focused on the measurement of the TOA of the AE because they are the basis for the localization of the AE source. In these tests two

sweeps of the AE source were done: one along the x axis and the other along the z axis, as shown in figure 8(a) and (b), respectively. A detail of the acoustic test bench used in these tests is also shown in figure 8(c). The sweep in the x axis was done following a line placed over the middle of three areas that were occupied by windings of 20 cm diameter. The displacement of the AE source along this line is 5 cm between two consecutive measurements. The AE are detected with the three sensors simultaneously.

The results presented in figure 9 show the normalized amplitudes of the AE signal detected at each sensor during the test in the sweep along the x axis. It can be seen that using this configuration it is possible to detect the same AE with at least two adjacent sensors obtaining, for this particular case, signals with amplitudes higher than a half of the maximum (0.5 of the normalized amplitude). However, although this condition depends on the distance between the transformer windings, the distance from the sensors to the windings can also be adjusted in order to optimize the detection with at least two sensors. This configuration allows both locating the AE source in 2D using triangulation and in the worst case, when it is not possible to detect the same signal in two adjacent sensors; the detection with one sensor provides information about the winding where a failure is occurring.

The measurements of the TOA obtained for the sweep in the x axis are shown in figure 10(a). On the other hand, the measurements of the TOA for the sweep in the z axis were taken with the sensors S2 and S3 (figure 10(b)). The displacement of the AE source between two consecutive measurements is also 5 cm in this test.

The maximum deviation observed in the measurements for both cases, x and z axes, was 1 cm. This suggests that the resolution obtained by the system regarding the measure of the TOA is 1 cm, which is about 1% of the maximum dimension of the tank.



(c)

Figure 8. Experimental set-up used in the implementation for the sweep of the AE source (a) in the x axis and (b) in the z axis; (c) photographic detail of the acoustic test bench.

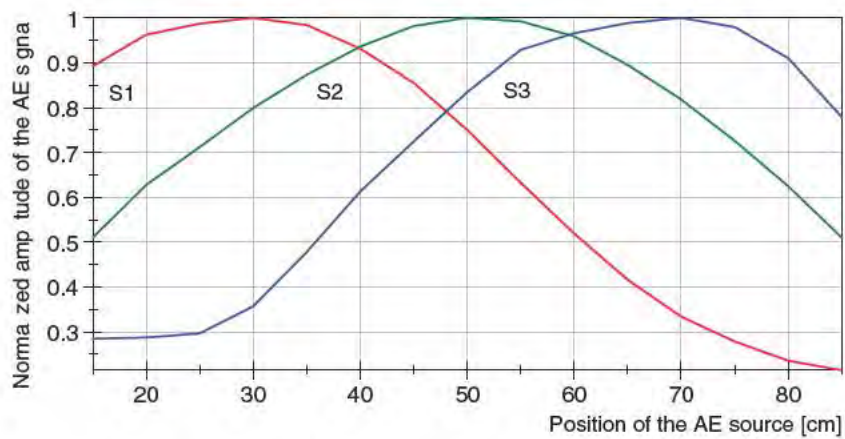


Figure 9. Attenuation profile of the signal detected at each sensor with respect to the AE source location in the windings.

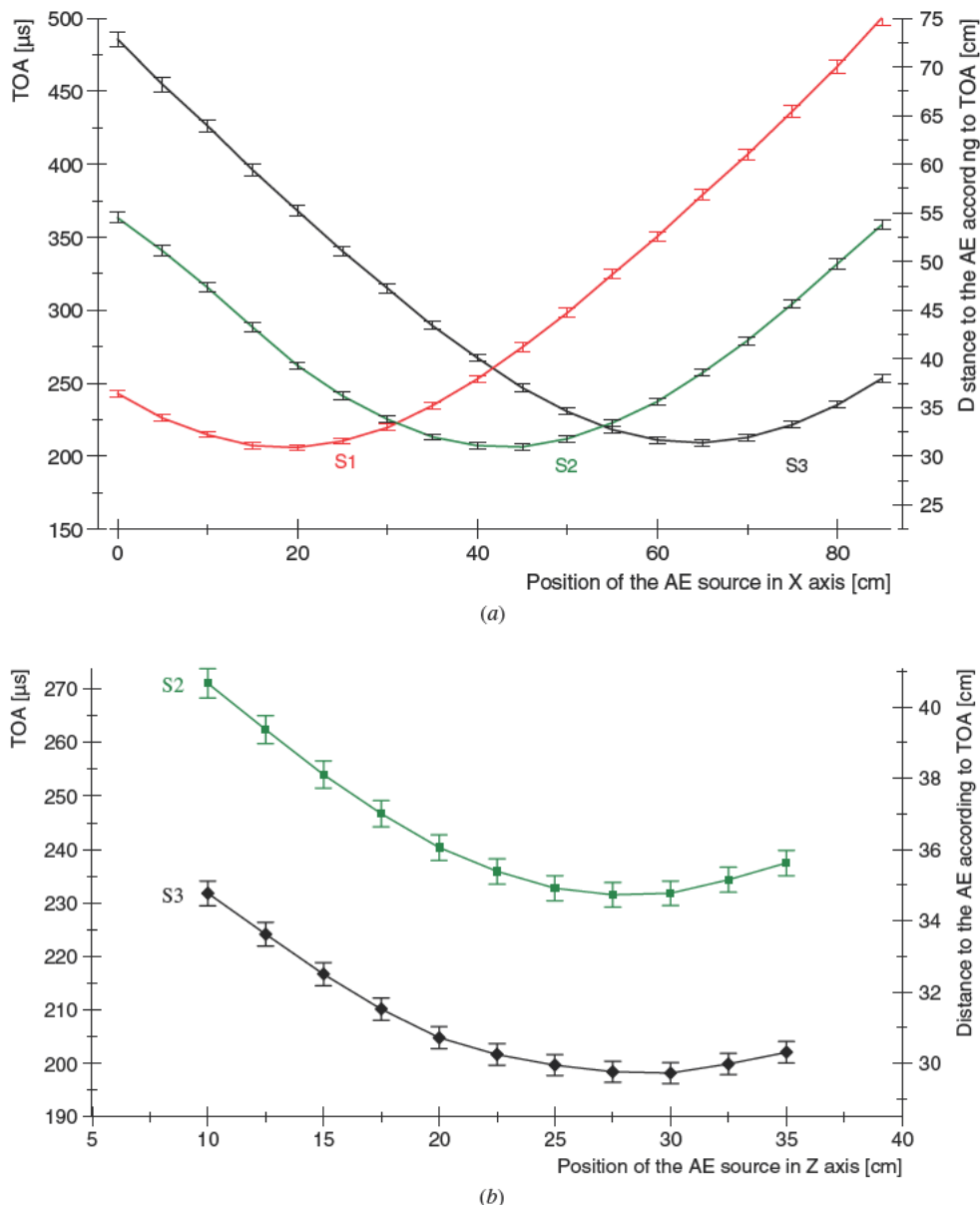


Figure 10. Measurements of the TOA for different placements of the AE source: (a) in the x axis and (b) in the z axis.

6. Conclusions

A heterodyne interferometric scheme for multichannel detection of partial discharges with intrinsic OF sensors was presented. The interferometric system was tested by taking measurements of ultrasound emissions at 150 kHz in each channel. An experimental test bench of acoustic emissions in water was used for this purpose. The resolution of the system was evaluated as well as the detection with four channels. The results show a resolution better than 10 Pa in each channel.

Moreover, a configuration for placing the sensors inside a transformer is proposed and was tested. It was demonstrated that by using this configuration the three windings of a transformer can be monitored, as well as the location of PD

by using triangulation being enabled or, in the worst case, the winding with the failure is identified.

Finally, experimental tests using the multichannel interferometric system for measuring the TOA of the AE signals have shown that a resolution of 1 cm is achieved for the TOA-based localization.

Although the resolution obtained is far from the one associated with the shot noise and thermal noise limits [12], it can also be improved by increasing the optical power, which will improve the SNR. A resolution target of 1 Pa with four channels is achievable. In addition, by these means more channels can be also added to the system but maintaining the SNR and the resolution. In this sense, future work is focused on minimizing the optical insertion losses of the AOM.

Acknowledgments

This work was supported by the Spanish National Ministry of Science and Innovation, under the R&D project no DPI 2009-14628-C03-01.

References

- [1] IEEE Std C57.127TM-2007 2007 *IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors* pp c1–47
- [2] Lundgaard L E 1992 Partial discharge—part XIV: acoustic partial discharge detection-practical application *IEEE Electr. Insul. Mag.* **8** 34–43
- [3] Eleftherion P M 1995 Partial discharge. XXI: acoustic emission based PD source location in transformers *IEEE Electr. Insul. Mag.* **11** 22–6
- [4] Wang X, Li B, Roman H T, Russo O L, Chin K and Farmer K R 2006 Acousto-optical PD detection for transformers *IEEE Trans. Power Deliv.* **21** 1068–73
- [5] Dong B, Han M, Sun L, Wang J, Wang Y and Wang A 2008 Sulfur hexafluoride-fill extrinsic Fabry–Pérot interferometric fiber-optic sensors for partial discharge detection in transformers *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1566–8
- [6] Lima S E U, Frazão O, Farias R. G, Araújo F M, Ferreira L A, Santos J L and Miranda V 2010 Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges—a proof of concept *IEEE Trans. Power Deliv.* **25** 2526–34
- [7] Posada J E, Garcia-Souto J A and Rubio-Serrano J 2012 Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems *Sensors* **12** 4793–802
- [8] Knudsen S and Blotekjaer K 1994 An ultrasonic fiber-optic hydrophone incorporating a push–pull transducer in a Sagnac interferometer *J. Lightwave Technol.* **12** 1696–700
- [9] Kirkendall C K and Dandridge A 2004 Overview of high performance fiber-optic sensing *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 197–216
- [10] Pedreira P, Esteban L, Criado A R, Acedo P, Sánchez M and Sánchez J 2010 Two color multichannel heterodyne interferometer set up for high spatial resolution electron density profile measurements in TJ-II *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10D517
- [11] Rubio-Serrano J, Rojas-Moreno M, Posada-Roman J E, Martínez-Tarifa J, Robles G and Garcia-Souto J 2012 Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 1569–78
- [12] Wanser K H 1992 Fundamental phase noise limit in optical fiber due to temperature-fluctuation *Electron. Lett.* **28** 53–4

Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in power transformers

This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text.

View [the table of contents for this issue](#), or go to the [journal homepage](#) for more

Download details:

IP Address: 163.117.157.119

This content was downloaded on 20/11/2013 at 16:02

Please note that [terms and conditions apply](#).

5 Experimental results related to the application

Some of the experimental results oriented to the application of PD detection have been shown before in sections 3 and 4. These are as follows:

- 1) The acoustic measurements of PD in HVAC setups [41]. Both, internal PD and surface PD were detected with the FO probe immersed in oil.
- 2) The acoustic measurements of PD in HVDC setups [42].
- 3) The simultaneous detection of AE with 3-channels of the heterodyne interferometer and the measurements of the times of arrival (TOA) from the AE source to the sensors [45].

In this section, the experimental results of localization of AE sources are presented.

An acoustic test bench was designed to emulate a transformer tank and to reproduce AE with similar characteristics to those produced by PD in transformers with oil-paper insulation. Experimental tests were done with the sensors immersed in water. A localization algorithm based on the measurement of the times of arrival (TOA) from the AE source to each sensor is applied to the scenario of three internal fiber-optic sensors. Each sensor is used for AE monitoring of an area and all sensors are involved, along with the zero time reference, in the localization of the AE source.

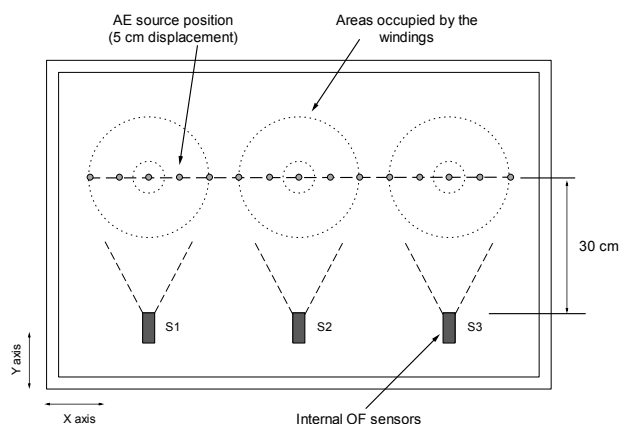


Figure 2. Set up of the AE source localization experiments. Sweep in x axis.

An AE source (ultrasound transducer) was placed at different positions in the tank making sweeps along the x axis. Figure 2 shows a detail of the sweep performed in the

experiment. The total distance covered by the sweeps was 80 cm in the x axis and 25 cm in the z axis. The spacing between consecutive positions of the AE source is 5 cm in both cases. Note that, as it is stated in the attached paper to previous section [45], although the proposed configuration uses six FO sensors for monitoring a three-phase transformer, the symmetry of the tank enables simplifying the set-up of this experiment and using only three sensors for the localization.

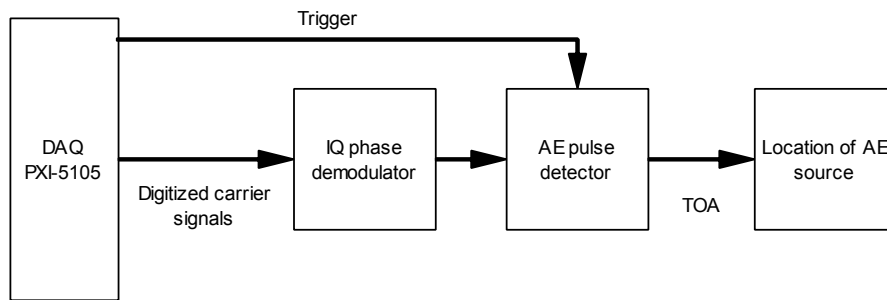


Figure 3. Simplified block diagram of the VI implemented for the localization of AE sources

The TOA were obtained using a virtual instrument (VI) implemented in LabVIEW. The simplified diagram of the VI is shown in figure 3. In this VI, first, the digitized carriers of each channel are demodulated and the AE signals are recovered. Then, they are processed by a pulse detector, which finds the time instants when the AE is detected at each channel and calculates the time differences between a trigger signal and the AE. In the practical application the trigger signal can be a signal from an electrical PD sensor, in which case an acoustic location system with electrical trigger is obtained. As an alternative, an additional AE sensor can be used instead of the electrical trigger in order to obtain an all-acoustic system [50]. Finally, the obtained TOAs are used in the location block that calculates the position of the AE source using a trilateration algorithm. The development of the localizing algorithm is part of other work carried out in parallel with this research [51]. Unlike other localization algorithms that solve an equations system [19], the approach implemented here is based on a lookup table, which avoids the non-convergence problems of the equation solvers. In this case, the complexity of computing is transferred to a larger memory size.

In order to evaluate the errors in the localization of AE sources, noise of uniform distribution was intentionally introduced into the TOA measurements of each channel. The maximum amplitude of the added noise was equivalent to $30 \mu\text{s}$, which corresponds to a deviation of ± 2 cm (3% of the normalized dimension of the tank). Take into account

the velocity of the AE in water is $1.49 \text{ mm}/\mu\text{s}$ @ 25° C . The positions of the AE source that were found by the instrumentation system are presented in figure 4.

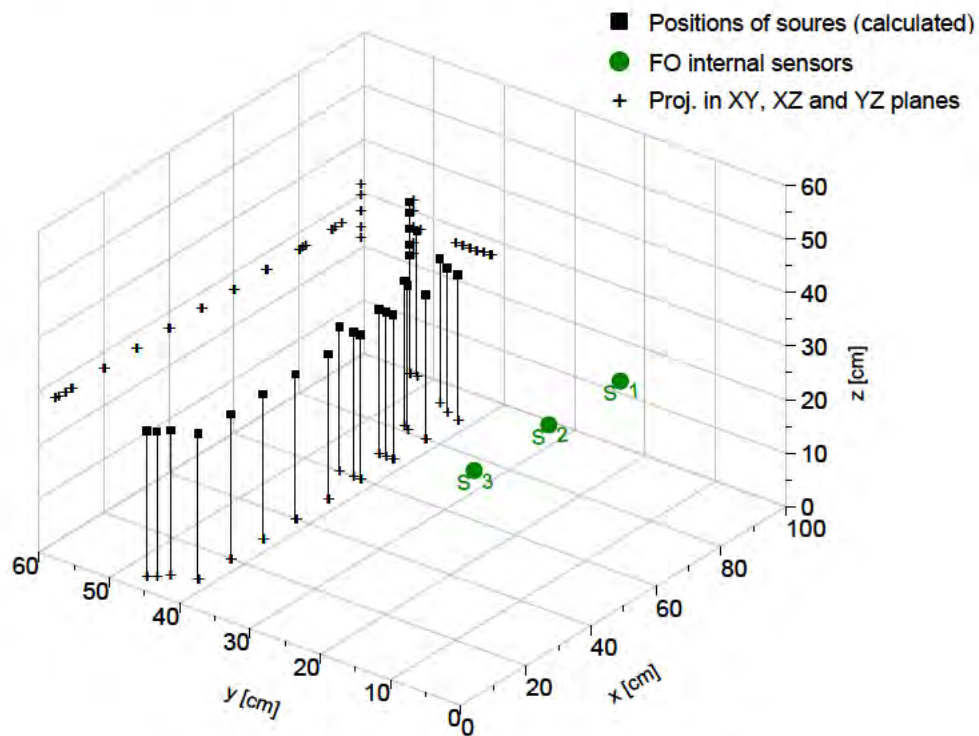


Figure 4. Results of the AE sources localization

These results of AE localization show an increase of the dispersion in the zones that are closer to the end of the sweep. This is observed in more detail in figures 5(a) and 5(b), in which the projections of the positions on the planes x - y and x - z are shown.

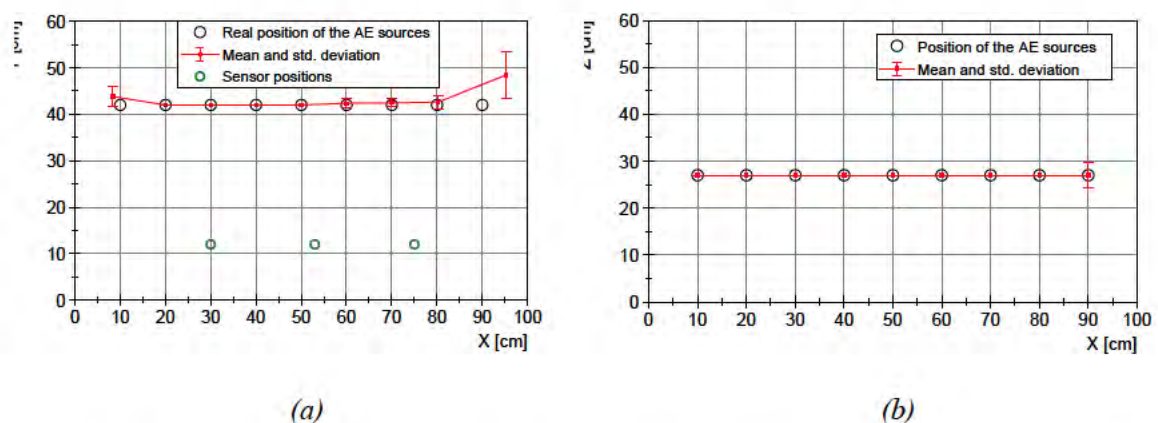


Figure 5. Projection of the AE sources found by the system on (a) x - y plane and (b) y - z plane

The dispersion at the extremes is produced by the attenuation of the acoustic signal received at the sensor placed in the opposite extreme. In this case, the angle of incidence

to that sensor has also a great impact on the quality of the detected signal. However, even with these effects, the resolution achieved in the localization is 1 cm in each axis, which is $\sim 1\%$ of the largest dimension in the tank.

6 Conclusions and future work

This dissertation presents the research on a new optoelectronic instrumentation system able to detect the projection on several points (multi-point / multi-channel) of the AE from PD in oil-paper insulated transformers. It is focused on a new fiber-optic interferometric sensor being installed inside transformers (internal sensor) and a new fiber-optic multichannel heterodyne interferometer for the acoustic monitoring of PD and the localization of the AE sources. This chapter summarizes the major achievements and conclusions during the research.

A comprehensive study of the state of the art of internal FO sensors and multiplexing systems for the acoustic measurement of PD was carried out. As a result, a new multi-channel interferometer for the multi-point detection of AE at 150 kHz with FO interferometric sensors is proposed for the application of PD monitoring. Upgraded sensors and systems are included, even though they were developed in parallel with this research and reported later than the proposal.

A FO interferometric sensor of high-sensitivity was developed for the acoustic measurement of PD in transformer oil. This FO probe was designed for the detection of ultrasound AE at 150 kHz. The design from a length of optical fiber to a compact, rugged and cost-effective sensing head was presented. The characteristics of the new probe are superior compared with any other type of internal FO sensor or compared with external PZT sensors, as it was demonstrated in the exhaustive characterization of the probe.

The experiments performed in a High Voltage setup for the controlled generation of different types of PD in transformer oil are reported. The acoustic detection with a FO sensor of PD of internal type was demonstrated for the first time. The detection of other types of PD such as surface PD and those generated in HVDC setups was also tested successfully. These results demonstrated that this FO probe is the most suitable for the application of acoustic detection of PD compared with other reported internal sensors since its publication and to date.

The multichannel instrumentation system for the acoustic detection of PD with internal FO sensors was designed on the base of a fiber-optic Mach-Zehnder heterodyne interferometer with multiple sensing arms in parallel and a common reference arm. A

low-cost short wavelength solid-state laser was used to illuminate the system. This laser is able to provide optical power to the 4-channels interferometer, but maintains the characteristics required to obtain a high performance system. A resolution of 1 Pa in the measurement of ultrasound acoustic pressure was achieved at each channel with this implementation. This is the best resolution achieved with a multichannel system for the application of acoustic detection of PD. In addition, the measurement range is more than 10 kPa (Range / Resolution > 10^4), thanks to the heterodyne approach and the digital demodulation.

The capability of the multichannel instrumentation system for the multipoint detection of AE and the localization of AE sources have been demonstrated experimentally. A specific configuration for locating the FO sensors within the transformer tank was also proposed and tested with ultrasound AE that reproduce the AE from PD. In the localization experiments, synthetic noise was introduced in the TOA measurements in order to demonstrate the robustness of the system. The results of these tests showed that this system is able to localize AE sources with a precision in each axis better than 1 cm.

There are a variety of FO interferometric sensors that have been designed for other purposes along the years, which are compatible with the multichannel interferometric system; therefore, the application of the multichannel system developed here can be extended to other fields. In the section devoted to the future work, new applications for this system are proposed, such as the 4-channels FO scheme for non-contact heterodyne detection of vibrations in experiments of impacts with low size particle in regimes of hypervelocity (Light Gas Gun at Kent University), which was developed and installed during a stay cited in the introduction and pending of publication.

The main contributions of this research work are summarized as follows:

1) The design of a FO probe optimized for the detection of AE at 150 kHz

It has been demonstrated that it is the most suitable FO probe for the acoustic detection of PD. Whereas other sensors based on Fabry Perot cavities and FBG are less sensitive and more complex because of the processes of fabrication or the systems that are necessary to interrogate them, the proposed FO interferometric sensor is a cost-effective, but high-sensitive and compact design. Other attempts

based on a FO coil are limited by their frequency response (15 kHz – 40 kHz), which in the proposed FO sensor was optimized for PD detection at 150 kHz (flat frequency response 100 kHz – 300 kHz). It was inspired on the characteristics of PZT sensors, but has better features than PZT sensors and is installed within power transformers.

2) The demonstration of the fiber-optic sensing probe in a variety of high voltage setups and with different types of PD

Other authors have reported acoustic measurements of corona PD, which produce intense bursts of AE. However, it was a challenge to demonstrate the generation of PD of different types in transformer oil and the detection of these PD. The fiber-optic sensing probe was successfully tested in high voltage AC setups, with internal partial discharges, with surface partial discharges, and also in high voltage DC setups that are a main topic of research in electrical systems and isolation systems. Therefore, the capacity of the sensor to detect PD under a wide range of conditions was also demonstrated. It is worth mentioning that the acoustic detection of internal partial discharges with a fiber-optic sensor was demonstrated for the first time and the measurements in HVDC setups are state-of-the-art experiments in this research field.

3) The design and development of a multi-channel practical scheme that maintains the resolution that was achieved with a system of one channel and, in addition, extends the range one order of magnitude

Even though there were sensors of AE from PD proposed in the literature, the multiplexing systems have been proposed only recently because the main efforts were focused on optimizing the sensor and interrogation system in terms of the sensitivity to the ultrasound frequencies at the expense of a complexity that is not compatible with multi-point measurements. The best resolution in the measurement of ultrasound acoustic pressure (in conditions of PD detection) was achieved with the proposed multichannel system based on a heterodyne interferometer. Moreover, it is also a cost-effective solution compared with others systems proposed recently for multipoint acoustic detection of PD.

Future work

Improvement for dense multichannel applications

The proposed multichannel interferometric system can be expanded for an implementation of up to 8 channels using exactly the same FO scheme and ADQ system. Given the requirements for acoustic monitoring of PD (range, resolution and bandwidth) that are satisfied by this system, it can also be used for other dense multichannel applications. However, to maintain the same features, any expansion should not be at the expenses of less optical power per channel. For this, some improvements in the power budget can be still obtained by optimizing the setup, as e.g. by using fiberized AOM devices. Optical power losses are mainly localized in the free-space devices that are available for the optical frequency shift of short wavelengths. In contrast, the optical power of these lasers can be increased without losing the performance of coherence and phase noise.

On the other hand, an additional stage of automatic gain control in the conditioning RF chains can help to compensate the mismatch of the signal to noise ratio among the channels. In this case, the carrier level of each channel can be monitored and equalized to have the same resolution in all channels.

Research on aging and lifetime estimation of FO sensors in oil-paper insulation systems

Power transformers are designed for long life; it can be over 35 years with an adequate maintenance. Therefore, in order to guarantee a reliable operation in the long-term installation of the new FO internal sensors, a lifetime estimation of them immersed in oil and under heat stress is needed.

Experiments that accelerate the aging of oil-paper insulators have been developed for years in the research field of electrical engineering and insulating materials. The aims are to study the degradation and to estimate the lifetime of oil-paper insulation systems [52]–[56]. In these experiments, samples of oil and paper with other materials used in the transformer, such as copper, etc., are exposed to conditions of thermal stress cycles and

moisture, among others, in order to accelerate the effects of aging the sample. Similar experiments to the aforementioned but with FO sensors immersed in different oil/paper samples are proposed for the aging study and lifetime estimation of these sensors in transformer oil environments. The behavior of the fiber regarding to the optical transmission/losses and the acoustic sensitivity, among others, can be monitored periodically during the experiments in order to evaluate the effects of aging in the sensor.

Extend the multichannel FO heterodyne interferometer to other applications

Other future work will be oriented towards new applications of the FO interferometric system. The multichannel instrumentation system has the potential of sensing other physical magnitudes, particularly fast dynamic signals because it has been developed for sensing ultrasounds. It is even compatible with wired (FO interferometric sensors) or non-contact probes. In this sense, another application for the system is the measurement of vibrations and the monitoring of impact tests in aero-structures [57].

Based on the same heterodyne multichannel interferometer, a multi-point non-contact fiber laser Doppler vibrometer (FLDV) can be implemented by adding small changes as can be seen in the proposed scheme shown in Fig. 6.

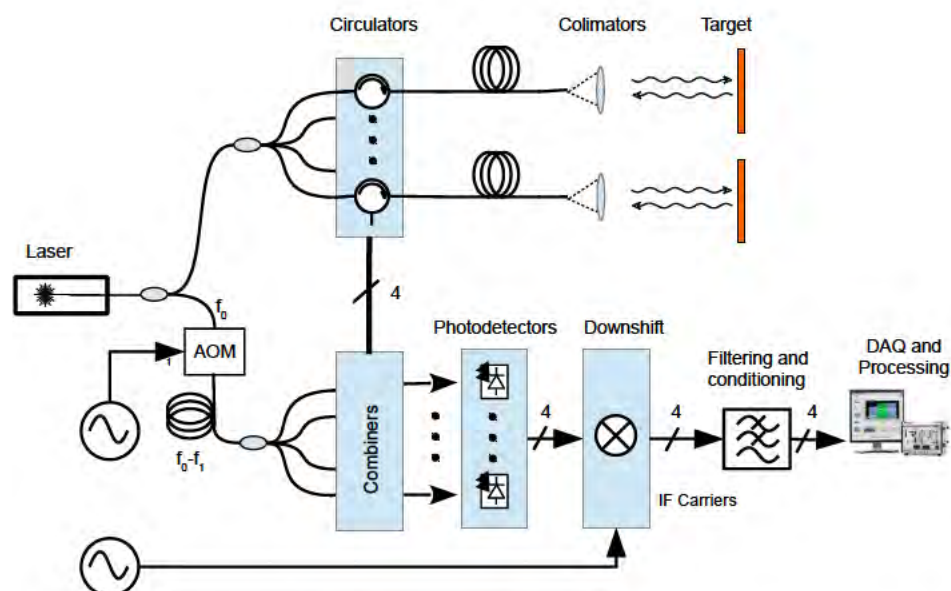


Figure 6. Simplified scheme of the proposed multipoint non-contact FLDV based on the multichannel FO heterodyne instrumentation system.

The sensing arms of the original system of Fig. 1 have been replaced in the scheme of Fig. 6 by a set of collimators and circulators in such a way that a folded Mach-Zehnder heterodyne interferometer is formed. The non-contact probe is composed by a fiber patch-cord and a collimator. A light beam is projected from the collimator to the vibrating target where it is back reflected towards the circulator and interferes with the light of the reference arm in a 3dB coupler.

The proposed scheme has advantages over conventional LDV as it can provide a vibration measurement of high resolution at multiple points simultaneously. This characteristic can be useful in many applications, e.g. impact studies on materials and vibration tests of structures and large objects, as it is the case in automotive and aerospace industries. Based on this proposal, a 4-channels FO heterodyne LDV has now been developed for non-contact measurements of hyper-velocity impacts on composite materials. That research was performed in collaboration with the Applied Optics Group of the University of Kent, during a 3 months research stay of the author supervised by Prof. David A. Jackson. This system and the results of the experiments in the Light Gas Gun are pending publication.

Extend the multichannel FO heterodyne interferometer to the interrogation of FBG sensors

FBG sensors are interesting because of their small size and multiplexing capability. Wide measurement range can be obtained with FBG sensors, but rarely a high resolution without an interferometric interrogation system. Sensing low amplitude ultrasounds such as the AE produced by PD needs an interrogation system of very high resolution. In order to sense low amplitude AE signals a multichannel interferometric system is proposed for the interrogation of FBG sensors. It is designed for the interrogation of serial multiplexed FBG sensors in a ring laser configuration [35]. The proposed scheme is shown in Fig. 7.

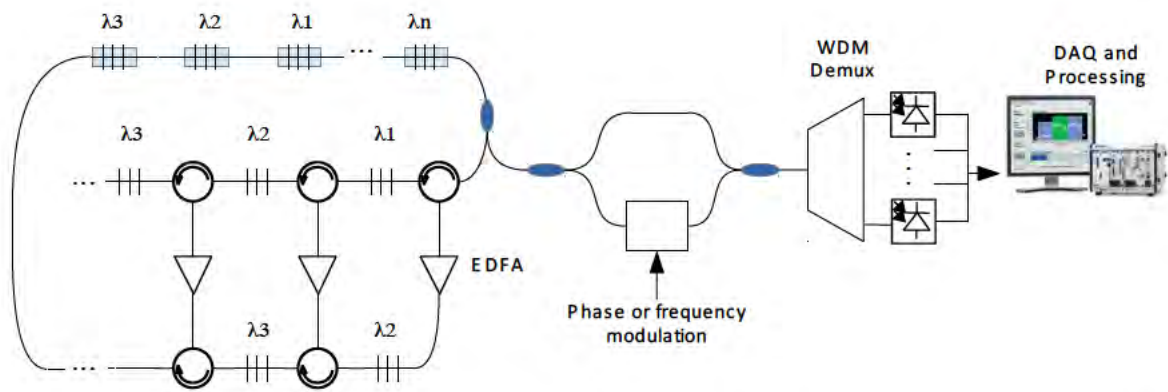


Figure 7. Simplified scheme of the proposed high-resolution multiplexing system based on an OF interferometer for the detection of ultrasound AE using FBG sensors

The multiplexed scheme uses phase-shifted chirped FBG that are serially multiplexed in the probe. They work in transmission and can be bonded to a mandrel in order to increase the acoustic sensitivity.

The proposed scheme includes an interferometric detection with a carrier approach that eliminates the feedback loops needed in other schemes [58] and increases the measurement range. This approach can be heterodyne, if an acousto-optic modulator is used, but others such as pseudo-heterodyne and phase-generated-carrier can be also implemented, if a phase modulator is included.

The proposed system gives the advantages of FBG sensors, such as the high density multiplexing in a single probe and the wide dynamic range, together with those provided by the interferometric interrogation, such as the high resolution.

List of publications related to this research work

Core of the thesis

Full Papers (Journals)

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems,” *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 4, pp. 4793–802, Jan. 2012.

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in power transformers,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 9, p. 094015, Sep. 2013.

SPIE / OFS volumes

J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano, and J. A. Garcia-Souto, “All-fiber interferometric sensor of 150kHz acoustic emission for the detection of partial discharges within power transformers,” in *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2011, Proc. of SPIE, vol. 7753, pp. 77531S–77531S–4.

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Multichannel fiber optic heterodyne interferometer for the acoustic detection of partial discharges,” in *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2012, Proc. SPIE, vol. 8421, p.p. 84211O–84211O–4.

I. Búa-Núñez, C. G. Azcárraga-Ramos, **J. E. Posada-Roman**, and J. A. Garcia-Souto, “Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments,” in *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2014, Proc. of SPIE, vol. 9157, p.p. 91572G–91572G–4.

IEEE conferences

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, “Intrinsic fiber optic ultrasound sensor for oil immersed detection of partial discharges,” in *IEEE SENSORS*, 2011, pp. 386–389.

J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, J. Rubio-Serrano, and I. Búa-núñez, “Multichannel Ultrasound Instrumentation for On-line Monitoring of Power Transformers with Internal Fiber Optic Sensors,” in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2013, p.p. 200–205.

Other related to the thesis

Related to the interferometric systems

D. A. Jackson, **J. E. Posada-Roman** and J. A. Garcia-Souto, “Calibration of a laser Doppler vibrometer exploiting Bessel functions of the first kind,” *Electronics Letters*, vol. 57, no. 14, pp. 1100 – 1102, Jul. 2015.

D. A. Jackson, **J. E. Posada-Roman**, and J. A. Garcia-Souto, “New topologies for fiber laser non-contact vibrometers,” in *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, 2014, pp. 1531–1534.

Related to the application of acoustic emission / partial discharges

J. Rubio-Serrano, M. Rojas-Moreno, **J. E. Posada-Roman**, J. M. Martínez-Tarifa, G. Robles, and J. A. Garcia-Souto, “Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 5, pp. 1569–1578, Oct. 2012.

C. Boya, M. Ruiz-Llata, **J. E. Posada-Roman**, and J. A. Garcia-Souto, “Identification of multiple partial discharge sources using acoustic emission technique and blind source separation,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 3, pp. 1663–1673, Jun., 2015.

I. Bua-Nunez, **J. E. Posada-Roman**, J. Rubio-Serrano, and J. A. Garcia-Souto, “Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 5, pp. 1002–1013, Nov. 2014.

References

- [1] V. Akhmatov, M. Callavik, C. M. Franck, S. E. Rye, T. Ahndorf, M. K. Bucher, H. Muller, F. Schettler, and R. Wiget, "Technical guidelines and prestandardization work for first HVDC Grids," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 1, pp. 327–335, 2014.
- [2] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12–25, Nov. 2002.
- [3] T. K. Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, no. 5, pp. 903–917, 2003.
- [4] Y. Wang, S. Gong, and S. Grzybowski, "Reliability Evaluation Method for Oil–Paper Insulation in Power Transformers," *Energies*, vol. 4, no. 9, pp. 1362–1375, Sep. 2011.
- [5] H. K. and S. Karmakar, "Incipient fault diagnosis of power transformers using optical spectro-photometric technique," in *Proc. SPIE 9654, International Conference on Optics and Photonics*, 2015, vol. 9654, p. 96540R.
- [6] V. Cruz, A. Costa, and M. Paredes, "Development and evaluation of a new DGA diagnostic method based on thermodynamics fundamentals," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 888–894, 2015.
- [7] J. Wada, G. Ueta, S. Okabe, and T. Amimoto, "Method to evaluate the degradation condition of transformer insulating oil - establishment of the evaluation method and application to field transformer oil," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 1266–1274, 2015.
- [8] A. Cavallini, G. Montanari, M. Tozzi, and X. Chen, "Diagnostic of HVDC systems using partial discharges," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 1, pp. 275–284, 2011.
- [9] N. D. Jacob, W. M. McDermid, and B. Kordi, "On-line monitoring of partial discharges in a HVDC station environment," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 3, pp. 925–935, 2012.
- [10] T. Leibfried, "Online monitors keep transformers in service," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 11, no. 3, pp. 36–42, Jul. 1998.
- [11] S. Tenbohlen and F. Figel, "On-line condition monitoring of power transformers," in *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, 2000, vol. 3, pp. 2211–2216.
- [12] IEEE-PC57.143/D21, "Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components." 2010.

- [13] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 3, pp. 8–17, 2002.
- [14] I. S. C57.104-1991, "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers," *IEEE Std C57.104-1991*. 1992.
- [15] G. C. Stone, "Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 5, pp. 891–903, Oct. 2005.
- [16] R. Bartnikas, "Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, no. 5, pp. 763–808, Oct. 2002.
- [17] S. Tenbohlen, D. Denissov, S. M. Hoek, and S. M. Markalous, "Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, pp. 1544–1552, 2008.
- [18] M. Hikita, S. Ohtsuka, and S. Matsumoto, "Recent trend of the partial discharge measurement technique using the UHF electromagnetic wave detection method," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 2, no. 5, pp. 504–509, 2007.
- [19] S. Markalous, S. Tenbohlen, and K. Feser, "Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, pp. 1576–1583, Dec. 2008.
- [20] M. D. Judd, "Experience with UHF partial discharge detection and location in power transformers," in *2011 Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2011, pp. 201–205.
- [21] M. D. Judd and I. B. B. Hunter, "Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: sensors and signal interpretation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 2, pp. 5–14, Mar. 2005.
- [22] M. D. Judd and I. B. B. Hunter, "Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors. Part 2: field experience," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 3, pp. 5–13, May 2005.
- [23] B. Yu, D. W. Kim, J. Deng, H. Xiao, and A. Wang, "Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers," *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 16, pp. 324–3250, Jun. 2003.
- [24] X. Wang, B. Li, Z. Xiao, S. H. Lee, H. Roman, O. L. Russo, K. K. Chin, and K. R. Farmer, "An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 15, no. 3, pp. 521–527, Mar. 2005.
- [25] S. E. U. Lima, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. a. Ferreira, J. L. Santos, V. Miranda, and O. Frazão, "Fiber laser sensor based on a phase-shifted chirped grating for acoustic sensing of partial discharges," *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 1, pp. 44–51, Mar. 2012.

- [26] C. Macià-Sanahuja, H. Lamela, and J. A. García-Souto, "Fiber optic interferometric sensor for acoustic detection of partial discharges," *J. Opt. Technol.*, vol. 74, no. 2, pp. 122–126, Feb. 2007.
- [27] B. Dong, M. Han, and A. Wang, "Two-wavelength quadrature multipoint detection of partial discharge in power transformers using fiber Fabry-Perot acoustic sensors," in *Fiber Optic Sensors and Applications IX, Proc. SPIE*, 2012, vol. 8370, p. 83700K–83700K–11.
- [28] S. E. U. Lima, O. Frazão, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, V. Miranda, and J. L. Santos, "Extrinsic and intrinsic fiber optic interferometric sensors for acoustic detection in high-voltage environments," *Opt. Eng.*, vol. 48, no. 2, p. 024401, Feb. 2009.
- [29] S. E. U. Lima, O. Frazão, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and V. Miranda, "Mandrel-Based Fiber-Optic Sensors for Acoustic Detection of Partial Discharges—a Proof of Concept," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 2526–2534, Oct. 2010.
- [30] K. Wang, X. Tong, and X. Zhu, "Transformer partial discharge monitoring based on optical fiber sensing," *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 2, pp. 137–141, 2014.
- [31] H. Lamela-Rivera, C. Macià, and J. A. Garcia-Souto, "Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power transformers," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 5, no. 1, pp. 66–72, Jan. 2003.
- [32] Z. Zhiqiang, M. Macalpine, and M. S. Demokan, "The Directionality of an Optical Fiber High-Frequency Acoustic Sensor for Partial Discharge Detection and Location," *J. Light. Technol.*, vol. 18, no. 6, pp. 795–806, 2000.
- [33] L. Wang, N. Fang, C. Wu, H. Qin, and Z. Huang, "A fiber optic PD sensor using a balanced Sagnac interferometer and an EDFA-based DOP tunable fiber ring laser.," *Sensors (Basel)*, vol. 14, no. 5, pp. 8398–422, Jan. 2014.
- [34] S. E. U. Lima, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. a. Ferreira, J. L. Santos, V. Miranda, and O. Frazão, "Fiber laser sensor based on a phase-shifted chirped grating for acoustic sensing of partial discharges," *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 1, pp. 44–51, Aug. 2012.
- [35] T. Liu, L. Hu, and M. Han, "Multiplexed fiber-ring laser sensors for ultrasonic detection," *Opt. Express*, vol. 21, no. 25, p. 30474, 2013.
- [36] C. A. F. Marques, L. Bilro, L. Kahn, R. A. Oliveira, D. J. Webb, and R. N. Nogueira, "Acousto-optic effect in microstructured polymer fiber bragg gratings: Simulation and experimental overview," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 10, pp. 1551–1558, 2013.
- [37] A. D. Dandridge and A. D. Kersey, "Multiplexed Interferometric Fiber Sensor Arrays," in *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors, Proc. SPIE*, 1992, vol. 1586, pp. 176–183.

- [38] A. D. Kersey, "Distributed and multiplexed fiber optic sensors," in *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 2nd ed., E. Udd and W. B. Spillman, Eds. New Jersey: Wiley, 2011, pp. 277–311.
- [39] J. A. García-Souto and H. Lamela Rivera, "Multichannel fiber-optic interferometric sensor for measurements of temperature and vibrations in composite materials," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 5, pp. 780–787, 2000.
- [40] J. E. Posada, J. Rubio-Serrano, and J. a. Garcia-Souto, "All-fiber interferometric sensor of 150kHz acoustic emission for the detection of partial discharges within power transformers," in *21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Proceedings of the SPIE*, 2011, vol. 7753, p. 77531S–77531S–4.
- [41] J. E. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, "Intrinsic fiber optic ultrasound sensor for oil immersed detection of partial discharges," in *IEEE SENSORS*, 2011, pp. 386–389.
- [42] J. Posada-Roman, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, "Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems," *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 4, pp. 4793–802, Jan. 2012.
- [43] I. Búa-núñez, C. G. Azcárraga-ramos, J. E. Posada-román, and J. A. Garcia-souto, "Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments," in *Proc. of SPIE, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2014, vol. 9157, p. 91572G–91572G–4.
- [44] J. E. Posada, J. a. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, "Multichannel fiber optic heterodyne interferometer for the acoustic detection of partial discharges," in *Proc. SPIE 8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2012, vol. 8421, p. 84211O–84211O–4.
- [45] J. E. Posada, J. A. Garcia-Souto, and J. Rubio-Serrano, "Multichannel optical-fibre heterodyne interferometer for ultrasound detection of partial discharges in power transformers," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 9, p. 094015, Sep. 2013.
- [46] B. Davarcioglu, "An Overview of Diode Pumped Solid State (DPSS) Lasers," *Int. Arch. Appl. Sc. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 2010.
- [47] J. Hrabina, J. Lazar, M. Holá, and O. Cíp, "Frequency noise properties of lasers for interferometry in nanometrology," *Sensors (Basel)*, vol. 13, no. 2, pp. 2206–19, Jan. 2013.
- [48] A. D. Kersey, K. J. Williams, A. Dandridge, and J. F. Weller, "Characterization of a Diode Laser-Pumped Nd:YAG Ring Laser for Fiber Sensor Applications," in *Optical Fiber Sensors*, 1989, vol. 44, pp. 172–178.
- [49] D. A. Jackson, "Recent progress in monomode fibre-optic sensors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 621–638, 1994.

- [50] IEEE-Std-C57.127TM-2007, “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors,” vol. 2007, no. August. 2007.
- [51] I. Bua-Nunez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano, and J. A. Garcia-Souto, “Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 5, pp. 1002–1013, Nov. 2014.
- [52] D. H. Shroff, M. S. Eng, C. Eng, A. W. Stannett, and B. S. Eng, “A review of paper aging in power transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 132, no. 6, pp. 312 – 319, 1985.
- [53] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, “Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 230–239, Jan. 2004.
- [54] M. R. Meshkatoddini, “Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil,” *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 384–388, Apr. 2008.
- [55] M. Martins, “Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers-experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 26, no. 6, pp. 7–13, Nov. 2010.
- [56] K. Miyagi, E. Oe, N. Yamagata, and H. Miyahara, “Thermal aging characteristics of insulation paper in mineral oil in overloaded operation of transformers,” *Electr. Eng. Japan*, vol. 182, no. 2, pp. 1–8, Jan. 2013.
- [57] D. A. Jackson and M. J. Cole, “Fiber optic interrogation systems for hypervelocity and low velocity impact studies,” *Photonic Sensors*, vol. 2, no. 1, pp. 50–59, Sep. 2012.
- [58] S. E. U. Lima, O. Frazão, R. G. Farias, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, V. Miranda, and J. L. Santos, “Fibre laser sensor based on a phase-shifted chirped grating for acoustic sensing of partial discharges in power transformers,” in *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7653, pp. 765335–765335–4.