



## **TESIS DOCTORAL**

# ***Instrumentación Multicanal con Implementación de Técnicas de Reducción de Ruido y Procesado En-línea para la Detección de Ultrasonidos. Aplicación a la Localización de Emisiones Acústicas de Descargas Parciales***

***Multichannel Instrumentation with Implementation of Denoising  
Techniques and On-line Processing for Ultrasound Detection.  
Application to the Localization of Acoustic Emissions from Partial  
Discharges***

**Autor:**

**Iago Búa Núñez**

**Director/Tutor:**

**José A. García Souto**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**



## TESIS DOCTORAL

# INSTRUMENTACIÓN MULTICANAL CON IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE RUIDO Y PROCESADO EN-LÍNEA PARA LA DETECCIÓN DE ULTRASONIDOS. APLICACIÓN A LA LOCALIZACIÓN DE EMISIONES ACÚSTICAS DE DESCARGAS PARCIALES

**Autor:** Iago Búa Núñez

**Director/Tutor:** José A. García Souto

Firma del Tribunal Calificador:

Presidente: (Nombre y apellidos)

Firma

Vocal: (Nombre y apellidos)

Secretario: (Nombre y apellidos)

Calificación:

Leganés, de de 2015



# Agradecimientos

*La presente Tesis Doctoral es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los buenos y malos momentos.*

*Agradezco a mi tutor José A. García Souto por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo. Agradezco sus consejos y sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis Doctoral y sus atinadas correcciones.*

*Gracias también a mis compañeros, por ayudarme resolviendo todas mis dudas. Julio y Jesús, gracias. Gracias a Carlos y Andrea por hacer que mi estancia de investigación en Italia fuese tan fácil.*

*A mi familia por su apoyo incondicional.*

*Y a mi novia por estar siempre a mi lado.*

*A todos ellos, gracias.*



# Resumen

La medida de descargas parciales (*Partial Discharges* - PD) es un indicador muy fiable de la degradación del aislamiento eléctrico. Por esta razón, resulta muy interesante la monitorización de dicha actividad con el objetivo de analizar equipos eléctricos de alta tensión, tales como los transformadores, y de estudiar su probabilidad de fallo. En este sentido, se han desarrollado nuevas tecnologías para la detección de PDs, las cuales incorporan técnicas digitales de procesamiento de señal (filtrado digital, *wavelets*, etc.). Dentro de los métodos de detección de PDs en transformadores, la detección acústica posee grandes ventajas en términos de inmunidad a interferencias electromagnéticas y por su más fácil instalación en campo. Para la detección acústica se usan típicamente sensores ultrasónicos piezoeléctricos (PZT), que van ubicados externamente en las paredes del tanque del transformador y distribuidos para proporcionar información sobre la localización de la fuente de PDs. El proceso de localización de la fuente de emisión se puede aplicar sobre la base de los tiempos de llegada (*Times Of Arrival* – TOAs) de las emisiones acústicas (*Acoustic Emissions* – AEs) a los sensores. En la actualidad, se están desarrollando otros sensores que utilizan fibra óptica (*Optical Fiber* – OF). Estos sensores van inmersos en el medio aislante, lo que permite detectar una señal acústica más intensa, libre de interferencias por múltiple trayectoria y con una mejor relación señal a ruido.

En este trabajo de investigación, se propone un sistema de instrumentación multicanal para la detección y la localización de AEs de PDs basado en la utilización combinada de sensores intrínsecos de OF internos y sensores PZT externos. Este sistema posee bloques hardware específicos de acondicionamiento y adquisición de señales acústicas en plataformas PXI y varios bloques software para la detección y localización de señales acústicas.

Para la implementación del software, se proponen dos tipos de arquitecturas. La primera de ellas es una arquitectura simple que utiliza sólo instrumentos virtuales (*Virtual Instruments* – VIs) para implementar todas las etapas y operaciones en LabVIEW. Esta arquitectura incluye bloques software de adquisición, detección y reducción de ruido (*denoising*). Se han adaptado diferentes técnicas de reducción de ruido procedentes de las utilizadas para medidas eléctricas de PDs y se han implementado para medidas acústicas. Las más útiles son el filtrado wavelet junto con una implementación digital de filtros recomendados en el estándar (*WT + IEEE FILTER*). Este sistema de procesamiento obtiene mejoras significativas en ambientes ruidosos con señales débiles, lo que permite reducir el umbral de detección en un orden de magnitud y mejorar la precisión en la medida de los TOAs, que son la base del proceso de localización. Este hecho se ha demostrado experimentalmente con el sistema desarrollado.

Esta primera arquitectura integra como etapa de localización una basada en VIs, la cual implementa diferentes estrategias de trilateración para averiguar la posición de la fuente de emisión acústica (*Acoustic Emission Source* – AES) a partir de la información de los TOAs. El primer enfoque tiene dos pasos de refinamiento progresivo con el fin de reducir el tiempo de cómputo, pero obteniendo al mismo tiempo, una buena resolución espacial. En primer lugar, se realiza una localización gruesa en *dm* y en segundo lugar, se completa una localización más fina en *cm* limitada a la región que conforma la solución del primer paso. Con el fin de mejorar la relación entre las prestaciones y el coste computacional y la complejidad del sistema se implementó un segundo enfoque. Éste se basa en patrones de diferencias de tiempos, los cuales se calculan para cada posición del transformador y se almacenan en tablas de búsqueda. La posición de la fuente se obtiene al comparar el vector de diferencias de tiempos medido con las tablas de diferencias de tiempos que mapean espacialmente el transformador.

La segunda arquitectura es híbrida, combina dos herramientas de programación (LabVIEW - Matlab) con el fin de mejorar el rendimiento del sistema. La comunicación entre ambas partes se realiza mediante un protocolo de transferencia de paquetes (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol* – TCP / IP). El sistema está dividido en dos partes claramente diferenciadas. La primera de ellas es un diseño inspirado en VIs y realiza los procesos de adquisición, reducción de ruido y detección. Como parte de este procesamiento se obtienen los TOAs y se transfieren a la siguiente parte. La segunda parte está programada en Matlab y se dedica a la localización de la AES. Resuelve el sistema de ecuaciones de trilateración para un modelo 3D de localización. En ella se implementan y se compararon varias estrategias: el Método *Solve*, el Método de Mínimos Cuadrados, el Método de Mínimos Normalizados, el Método de Cramer, el Método No-Iterativo Indirecto y el Método de Optimización por Nube de Partículas.

Adicionalmente, se ha instalado el sistema en un esquema de monitorización de PDs en condiciones reales de alta tensión en AC (HVAC) y en DC (HVDC). Es importante mencionar que la caracterización del aislamiento en estos sistemas HVAC-DC representa un desafío para la red actual de transporte de energía eléctrica y este sistema de monitorización de PDs proporciona una herramienta que está a la vanguardia en este campo de investigación ya que incluye detección acústica, sensores de fibra óptica y localización de la fuente de PDs.

**Palabras clave:** Emisión Acústica, Detección de Ultrasonidos, Localización de la fuente, Descargas Parciales, Sistema de Instrumentación Multicanal, Sensores de Fibra Óptica, Reducción de Ruido, LabVIEW, Sistema de Programación Híbrido (LabVIEW – Matlab).



# Abstract

The measurement of partial discharges (PD) is a very reliable indicator of the degradation of the electrical insulation. For this reason, it is very interesting to monitor this activity with the aim of analyzing high-voltage electrical equipment such as transformers, and to study the probability of failure. In this sense, new technologies have been developed for the detection of PD, which incorporate digital techniques of signal processing (digital filtering, wavelets, etc.). Among the methods of PD detection in transformers, the acoustic detection has great advantages in terms of immunity to electromagnetic interference and easier installation in the field. Ultrasonic piezoelectric sensors (PZT) are typically used for the acoustic detection, which are located externally on the transformer tank walls and distributed to provide information about the location of the PD source. A localization process can be applied based on the times of arrival (TOA) of the acoustic emissions (AE) to the sensors. Currently, other sensors that use optical fiber (OF) are being developed. These sensors are immersed in the insulating medium, thus they detect more intense sound signals, free of interference from the multipath and with better signal to noise ratio.

In this research work, a multichannel instrumentation system for the detection and the localization of AE from PD is proposed on the base of using together internal OF intrinsic sensors and external ultrasonic PZT sensors. This system has specific hardware blocks of acoustic signal conditioning and acquisition on PXI platforms and several software blocks for detecting and locating the acoustic signals.

For implementing the software, two types of architectures are proposed in this work. The first one is a single architecture that utilizes only virtual instruments (VI) to implement all the stages and operations in LabVIEW. This architecture includes software blocks of acquisition, detection and noise reduction (denoising). Different techniques were adapted from electrical PD denoising and implemented for the acoustic measurements; the most useful are a wavelet filtering plus a digital implementation of the filters recommended in the standard (WT + IEEE FILTER). This denoising system obtains significant improvements in noisy environments with weak signals, allowing to reduce the detection threshold one order of magnitude and to improve the precision in the determination of the TOA, which is the base of the accuracy in the localization process. These were experimentally characterized with the developed system.

The architecture integrates a location stage in the VI structure and different trilateration strategies are implemented to find out the position of the acoustic emission source (AES) through the TOA. The first approach is divided into two parts of progressive refinement to reduce the computational time, but obtaining an adequate spatial resolution. First, a coarse location is performed in *dm* and second, a finer location in *cm* is obtained within the solution of the first part. In order to improve the ratio of performance over computation + complexity costs a second approach was implemented. This is based on time-differences patterns that are formed for each position in the transformer by mapping the internal structure and dimensions of the transformer as lookup tables. The source is located by comparing the measured time-differences vector with the time-differences lookup tables.

The second architecture is hybrid, which combines two programming tools (LabVIEW – Matlab) in order to improve the performance of the system. The communication between both tools is through a packet transfer protocol (Transmission Control Protocol / Internet Protocol - TCP/IP). The system is divided in two parts: the first is a VI inspired design and is devoted to the processes of acquisition, denoising and detection. As part of this processing the TOA are obtained and they are transferred to the next part. The second part is programmed in Matlab and it is dedicated to locating the AES. It solves the equations system of trilateration for a 3D model of localization. Several strategies are implemented and compared: the Solve Method, the Least Squares Method, the Least Norm Method, the Method of Cramer, the Indirect Non-Iterative Method and the Particle Swarm Optimization Method.

Additionally, the system was installed for monitoring experiments of PDs in real conditions of High Voltage Alternating Current (HVAC) and High Voltage Direct Current (HVDC). It is worth to mention that the characterization of the insulation in these high-voltage AC-DC systems is a challenge for the transportation network and this PD monitoring system provides a state-of-the-art tool for this purpose by combining acoustic detection, optical fiber sensing and localization of the source of PD.

**Keywords:** Acoustic Emission, Ultrasound Detection, Source Location, Partial Discharges, Multichannel Instrumentation System, Optical Fiber Sensors, Denoising, LabVIEW, Hybrid Programming (LabVIEW - Matlab).

# Índice general

RESUMEN .....	VII
ABSTRACT.....	IX
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Estructura de la memoria .....	4
1.4. Proyectos de investigación y colaboraciones.....	6
<b>2. DETECCIÓN DE EMISIONES ACÚSTICAS DE DESCARGAS PARCIALES.....</b>	<b>7</b>
2.1. Emisión acústica .....	7
2.2. Emisiones acústicas de descargas parciales.....	10
2.3. Sistemas de detección de emisiones acústicas .....	14
2.3.1. Sensores acústicos.....	14
2.3.1.1. Sensores piezoeléctricos .....	15
2.3.1.2. Sensores de fibra óptica .....	16
2.3.2. Sistemas de adquisición .....	20
2.3.3. Métodos de detección de emisiones acústicas.....	23
2.4. Técnicas de reducción de ruido ( <i>denoising</i> ) .....	23
2.4.1 Filtrado paso-banda recomendación IEEE Std c57.127.....	25
2.4.2 Filtrado wavelet.....	25
2.5. Conclusiones .....	30
<b>3. LOCALIZACIÓN DE EMISIONES ACÚSTICAS .....</b>	<b>31</b>
3.1. Algoritmos de localización .....	31
3.1.1. Trilateración.....	32
3.1.2. Enfoques de tiempos de llegada.....	36
3.1.2.1. Tiempos absolutos.....	37
3.1.2.2. Diferencias de tiempos.....	38
3.1.2.3. Pseudo-tiempos .....	39
3.2. Técnicas de medida de tiempos de llegada.....	41
3.2.1. Técnica de umbral o umbral de envolvente .....	41
3.2.2. Criterio de la energía ( <i>Energy Criterion - EC</i> ) .....	41
3.2.3. Criterio de información de Akaike ( <i>Akaike Information Criterion – AIC</i> ) .....	42
3.2.4. Técnica de correlación cruzada ( <i>Cross-Correlation - CC</i> ) con patrones.....	42
3.3. Estrategias de resolución de ecuaciones de localización.....	43
3.3.1. Métodos GPS .....	43
3.3.2. Método basado en tablas de búsqueda ( <i>LookUp Tables - LUTs</i> ).....	43
3.3.3. Método de Newton-Rapshon.....	44
3.3.4. Métodos de resolución matricial .....	45
3.3.5. Método de optimización por nube de partículas ( <i>Particle Swarm Optimization – PSO</i> ).....	47
3.4. Conclusiones .....	48

<b>4. ARQUITECTURAS Y PROCESAMIENTO PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE EMISIONES ACÚSTICAS .....</b>	<b>49</b>
4.1. Sensores de ultrasonidos y hardware de acondicionamiento y adquisición .....	50
4.1.1. Instrumentación con sensores PZT .....	50
4.1.2. Instrumentación con sensores de fibra óptica .....	51
4.1.3. Hardware de adquisición de señal .....	54
4.2. Software de adquisición, detección de emisiones acústicas y reducción de ruido ( <i>denoising</i> ) .....	55
4.2.1. Etapa de adquisición y detección de emisiones acústicas.....	55
4.2.2. Etapa de reducción de ruido ( <i>denoising</i> ) .....	57
4.2.3. Etapa de identificación de descargas parciales .....	62
4.3. Software de localización de la fuente de emisión acústica .....	64
4.3.1. Arquitectura simple (LabVIEW) - Arquitectura 1 .....	64
4.3.1.1. Localización basada en mallado 3D con refinado progresivo .....	65
4.3.1.2. Localización basada en tablas de diferencias de tiempos de llegada .....	68
4.3.2. Arquitectura mixta/híbrida (LabVIEW - Matlab) - Arquitectura 2 .....	71
<b>5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>75</b>
5.1. Caracterización del sistema.....	75
5.1.1. Configuración del experimento .....	76
5.1.2. Análisis de la dispersión de los tiempos de llegada .....	77
5.1.3. Aplicación del algoritmo de localización espacial.....	78
5.1.4. Conclusiones.....	81
5.2. Caracterización de la arquitectura de localización 1.....	81
5.2.1. Sistema de instrumentación .....	81
5.2.2. Configuración del experimento .....	84
5.2.3. Análisis de la precisión en la localización .....	84
5.2.4. Propagación de errores de los tiempos de llegada al algoritmo de localización .....	86
5.2.5. Influencia del número de sensores y sus posiciones.....	87
5.2.6. Conclusiones.....	88
5.3. Medidas en condiciones de corriente continua de alta tensión (HVDC).....	89
5.3.1. Sistema de instrumentación .....	89
5.3.2. Configuración experimental .....	90
5.3.3. Medida de descargas parciales en HVAC.....	91
5.3.4. Medida de descargas parciales en HVDC.....	91
5.3.5. Conclusiones.....	93
5.4. Caracterización de la arquitectura de localización 2.....	94
5.4.1. Sistema de instrumentación .....	94
5.4.2. Comparativa entre estrategias de resolución de ecuaciones de localización .....	95
5.4.3. Análisis de la propagación de errores en el proceso de localización .....	97
5.4.4. Conclusiones.....	101
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>103</b>
6.1. Conclusiones .....	103
6.2. Trabajo futuro .....	106
6.3. Listado de publicaciones.....	107
<b>7. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK.....</b>	<b>109</b>
7.1. Conclusions.....	109
7.2. Future work.....	112
7.3. List of publications .....	113
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>115</b>

<b>ANEXOS.....</b>	<b>125</b>
<b>EXTENDED SUMMARY OF THE PHD THESIS .....</b>	<b>139</b>
1. Introduction.....	147
2. Acoustic emissions from partial discharges.....	153
3. Sensors, conditioning and acquisition.....	159
4. Denoising.....	163
5. Characterization of the system.....	165
6. Location architecture 1 and characterization .....	171
7. Measurements in conditions of high voltage direct current (HVDC).....	181
8. Location architecture 2 and characterization .....	187
9. Conclusions.....	197
10. List of Publications.....	201
11. Attached Publications.....	203
Acoustic Detection and Localization of PD using PZT and OF Sensors .....	203
Acoustic Detection of PD in HVDC-AC Setups .....	217
Detection of AE and Localization of AES by using a Hybrid Programming System .....	223
References.....	237



# Índice de figuras

Figura 2.1. Ejemplos de AE en a) y varias AEs superpuestas en b).....	8
Figura 2.2. AE provocada por una grieta en un metal. ....	9
Figura 2.3. Transformador trifásico real (Alzado y Planta en cm). ....	10
Figura 2.4. PD corona. ....	11
Figura 2.5. PD superficial. ....	11
Figura 2.6. PD interna. ....	12
Figura 2.7. Campo eléctrico en una cavidad esférica. ....	12
Figura 2.8. Evolución de los diferentes campos desde el inicio hasta la extinción de las PDs. ....	13
Figura 2.9. Proceso de PDs en un ciclo de red. ....	14
Figura 2.10. Estructura del sensor PZT. ....	16
Figura 2.11. Transductor ultrasónico PZT, modelo R15I-AST. ....	16
Figura 2.12. Configuración Mach-Zehnder. ....	17
Figura 2.13. Configuración Michelson. ....	18
Figura 2.14. Configuración Sagnac. ....	18
Figura 2.15. Configuración Fabry-Perot. ....	19
Figura 2.16. AMSY-6 de Vallen Systeme. ....	21
Figura 2.17. PowerPAC de Physical Acoustics. ....	21
Figura 2.18. LAN-XI de Brüel & Kjær. ....	22
Figura 2.19. PXI de National Instruments. ....	22
Figura 2.20. Detección por umbral. ....	23
Figura 2.21. Filtro paso-banda IEEE. ....	25
Figura 2.22. Estructura del banco de filtros de análisis wavelet. ....	28
Figura 2.23. Señal original a), umbral duro b) y umbral blando c). ....	29
Figura 3.1. Localización lineal de la AES en una tubería. ....	32
Figura 3.2. Trilateración 2D. ....	33
Figura 3.3. Trilateración 3D. ....	33
Figura 3.4. Diagramas de COLA: a) 2D y b) 3D. ....	34
Figura 3.5. Sensores acústicos externos en las paredes del tanque y la fuente de AE en el interior (coordenadas cartesianas). ....	36
Figura 3.6. Esquemático de tiempos de llegada con referencia de tiempos conocida (trigger eléctrico/electromagnético). ....	37

Figura 3.7. Esquemático de diferencias de tiempos con referencia de tiempos desconocida (T)..	38
Figura 3.8. Esquemático de pseudo-tiempos con referencia de tiempos desconocida ( $\Delta t$ ).	39
Figura 3.9. Cálculo de TOA por umbral.	41
Figura 3.10. Señal acústica con su curva de energía.	42
Figura 3.11. Modelo de espacio de estudio (LUT 3D).	43
Figura 4.1. Estructura básica de hardware y software de detección y localización de AEs.	50
Figura 4.2. Sistema de instrumentación basado en sensores PZT (R15I-AST).	51
Figura 4.3. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación basado en sensores de OF.	53
Figura 4.4. Plataforma PXI a), módulo NI PXI-5105 b) y sistema completo de adquisición multicanal del laboratorio c).	54
Figura 4.5. NI-SCOPE Express y panel de configuración personal del NI-SCOPE Express.	55
Figura 4.6. NI-SCOPE Express modificado a) y panel de configuración general de la adquisición (dentro del panel frontal general) b).	56
Figura 4.7. Filter y panel de configuración personal de Filter a) y Wavelet Denoise y panel de configuración personal de Wavelet Denoise b).	58
Figura 4.8. Filter modificado a) y Wavelet Denoise modificado b).	59
Figura 4.9. Panel de configuración de filtrado (dentro del panel frontal general).	59
Figura 4.10. Diagrama de bloques para el cálculo de los TOAs (VI_TOA (X%)).	60
Figura 4.11. Diagrama de bloques con secuencia de reducción de ruido y cálculo de los TOAs.	60
Figura 4.12. Panel para la selección de canales a visualizar.	61
Figura 4.13. Estructura básica con identificación de PDs.	62
Figura 4.14. Hardware generador rampa (referencia de red) a), relación rampa/señal red b).	62
Figura 4.15. Parámetros patrón PRPD ( $V_{PD}$ , $\varphi'$ ) a), gráfico de adquisición de PD b) y representación patrón PRPD acústico c).	63
Figura 4.16. Arquitectura simple (LabVIEW) – Arquitectura 1.	64
Figura 4.17. Modelo de algoritmo basado en mallado 3D con refinado progresivo.	65
Figura 4.19. Panel de configuración de la localización.	67
Figura 4.20. Panel de localización.	67
Figura 4.21. Modelo del tanque (LUT 3D).	68
Figura 4.22. Diagrama de flujo del proceso de localización.	69
Figura 4.23. Diagramas de flujo alternativos: a) búsqueda por secciones y b) búsqueda con refinado progresivo.	70
Figura 4.24. Plataforma experimental de localización de AES a) planta y b) alzado.	71
Figura 4.25. Sistema de adquisición multicanal con software de programación híbrido.	72
Figura 4.26. Arquitectura híbrida (LabVIEW - Matlab) – Arquitectura 2.	72
Figura 4.27. Diagrama de flujo del sistema de programación híbrido.	73
Figura 5.2. Plataforma de pruebas acústicas.	76
Figura 5.3. Plataforma experimental para la localización de la AES.	77
Figura 5.4. Resultados de la dispersión de los TDOAs de cada PZT (S1-S4) con el sensor de OF (64 Pa) como referencia de tiempo en a) y con el RH (18 Pa) en b).	78
Figura 5.5. Resultados de localización de AES (64 Pa). Tomando el sensor de OF como referencia, sin procesado ( $SN < 3$ ) en a) y con procesado ( $SN \geq 3$ ) en b).	79
Figura 5.6. Resultados de localización de AES (18 Pa). Tomando el RH como referencia, sin procesado ( $SN < 3$ ) en a) y con procesado ( $SN \geq 3$ ) en b).	80
Figura 5.7. Sistema de instrumentación multicanal para la detección y localización de AEs.	83
Figura 5.8. Detalle del experimento para la detección y localización de AEs.	84
Figura 5.9. Localización de AES.	85
Figura 5.10. Localización de AEs basada en la matriz de desviación de tiempos. Representación del gradiente de la solución: a) gráfico 2D con valor constante de la coordenada, b) proyección XZ y c) proyección YZ.	86



Figura 5.11. Representación del error límite máximo para un retardo del 1% y el 10% en uno o más sensores. ....	87
Figura 5.12. Representación del error límite máximo cuando se eliminan uno o más sensores. ...	88
Figura 5.14. Esquema del sistema de ensayos en HVDC para la generación y detección de PDs.	90
Figura 5.15. Gráfico de adquisición de PDs a) y representación patrón PRPD acústico b). ....	91
Figura 5.16. Resultados de la medida de PDs en condiciones de HVDC. [Tiempo en s, Amplitud en V] .....	92
Figura 5.17. Resultados de localización de PDs (HVDC). ....	93
Figura 5.18. Esquema experimental para la detección y localización de AEs con un sistema de programación híbrido – LabVIEW/Matlab. ....	94
Figura 5.19. Sistema de programación híbrido para la detección y localización de AEs. ....	95
Figura 5.20. Resultados de localización de AES con soluciones dispersas [mm] (41 soluciones por método): a) INI y PSO; b) Solve, LS, LN y Cramer. ....	96
Figura 5.21. Barrido del tanque a) Eje XY (planta) y b) Eje XZ (alzado). ....	98
Figura 5.22. Resultados (2%) del barrido en X en a), del barrido en Y en b) y del barrido en Z en c). ....	99
Figura 5.23. Resultados (10%) del barrido en X en a), del barrido en Y en b) y del barrido en Z en c). ....	100



# Índice de tablas

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE OF .....	51
TABLA II. POSICIONES DE LOS SENSORES .....	84
TABLA III. POSICIONES DE LOS SENSORES .....	95
TABLA IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS TOAs POR SENSOR .....	96
TABLA V. ERRORES DE LOCALIZACIÓN .....	97
TABLA VI. TIEMPOS DE CÓMPUTO .....	97



# Índice de acrónimos

AC:	Alternating Current – Corriente Alterna
AE:	Acoustic Emission – Emisión Acústica
AES:	Acoustic Emission Source – Fuente de Emisión Acústica
AIC:	Akaike Information Criterion – Criterio de Información de Akaike
CC:	Cross-Correlation – Correlación Cruzada
CWT:	Continuous Wavelet Transform – Transformada Wavelet Continua
DC:	Direct Current – Corriente Continua
DUT:	Discrete Wavelet Transform – Transformada Wavelet Discreta
DWT:	Device Under Test -- Dispositivo Bajo Prueba
EC:	Energy Criterion – Criterio de la Energía
FPGA:	Field Programmable Gate Array
FPI:	Fabry-Perot Interferometer – Interferómetro Fabry-Perot
GIS:	Gas Insulated Substations – Subestaciones Aisladas por Gas
GPS:	Global Positioning System – Sistema de Posicionamiento Global
HVAC:	High Voltage Alternating Current – Corriente Alterna de Alta Tensión
HVDC:	High Voltage Direct Current – Corriente Continua de Alta Tensión
IDWT:	Inverse Discrete Wavelet Transform – Transformada Wavelet Discreta Inversa
INI:	Indirect Non-Iterative – Indirecto No-Iterativo
IP:	Internet Protocol – Protocolo de Internet
LN:	Least Norm – Mínimos Normalizados
LS:	Least Squares – Mínimos Cuadrados

LUT:	Look-Up Table – Tabla de Búsqueda
MI:	Michelson Interferometer – Interferómetro Michelson
MZI:	Mach-Zehnder Interferometer – Interferómetro Mach-Zehnder
OF:	Optical Fiber – Fibra Óptica
PC:	Personal Computer – Ordenador Personal
PD:	Partial Discharge – Descarga Parcial
PMMA:	Polymethylmethacrylate – Polimetilmetacrilato
PRPD:	Phase Resolved Partial Discharge – Descarga Parcial Resuelta en Fase
PSO:	Particle Swarm Optimization – Optimización por Nube de Partículas
PZT:	Lead Zirconate Titanate – Zirconato Titanato de Plomo
RH:	Receiver Hydrophone – Hidrófono Receptor
SI:	Sagnac Interferometer – Interferómetro Sagnac
SN:	Signal/Noise – Señal/Ruido
STD:	Standard Deviation – Desviación Típica Estándar
TCP:	Transmission Control Protocol – Protocolo de Control de Transmisión
TDOA:	Time Difference Of Arrival – Diferencia de Tiempos de Llegada
TOA:	Time Of Arrival – Tiempo de Llegada
WT:	Wavelet

# Capítulo 1

## Introducción

Este primer capítulo recoge la introducción general a la tesis doctoral y al presente documento. Incluye la motivación, los objetivos y la estructura de la memoria. Adicionalmente, se indican los proyectos y marcos de colaboración de este trabajo de investigación.

### 1.1. Motivación

En la sociedad actual, el suministro de energía eléctrica es un concepto de vital importancia, siendo necesario garantizarlo en todo momento y lugar. Por ello, resulta fundamental la aplicación de estrategias de mantenimiento que impliquen la monitorización, el análisis y el diagnóstico de plantas y equipos de generación, transmisión y distribución de energía.

Durante los últimos años se ha incrementado el interés por la medida de descargas parciales (Partial Discharges - PDs) debido a que representa un indicador muy fiable de la degradación de los aislantes eléctricos [1.1]. Por esta razón, resulta muy interesante la monitorización de dicha actividad con el objetivo de analizar equipos eléctricos de alta tensión, tales como transformadores de alta tensión de corriente alterna (High Voltage Alternating Current - HVAC) y transformadores de alta tensión de corriente continua (High Voltage Direct Current - HVDC) [1.2-1.5]), y de estudiar su probabilidad de fallo.

La emisión acústica (Acoustic Emission - AE) es una técnica clásica para monitorizar estructuras sometidas a estrés (p.ej. térmico, mecánico, etc.) y dado que las PDs son producto del estrés eléctrico del material, también liberan AEs. Por ello, se ha propuesto desde hace tiempo transferir algunas de las técnicas de monitorización de AEs a la detección de PDs [1.6-1.8], que posteriormente han sido recogidas en un estándar [1.9]. Además, se abre la posibilidad de localizar la fuente de emisión acústica (Acoustic Emission Source - AES) y con ello la región

propensa al fallo. La detección acústica presenta importantes ventajas por su inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, por proporcionar información para la localización de la AES, tal como los tiempos de llegada (Times Of Arrival - TOAs) de la señal a los diferentes sensores, y por su fácil instalación en campo.

En lo referente a detección de AEs de PDs, se usan típicamente sensores de zirconato titanato de plomo (Lead Zirconate Titanate - PZT). En este campo se están desarrollando también otros sensores que emplean fibra óptica (Optical Fiber – OF) [1.10-1.14]. Para el caso de detección de PDs en transformadores, estos sensores resultan muy adecuados ya que van inmersos en el medio aislante (pegados al cartón o inmersos en el aceite), lo que permite detectar las señales directamente desde dentro del tanque del transformador, a diferencia de los sensores PZT que van ubicados externamente en las paredes del tanque. Los sensores de OF se pueden instalar durante la fase de fabricación de los equipos, mientras que los PZTs pueden ser instalados en equipos ya en funcionamiento. Se han tenido en cuenta las ventajas de estos dos tipos de sensores al realizar la propuesta de un sistema de medida completamente acústico que incluye sensores de FO internos y sensores PZT externos.

En el campo de la detección acústica, son varias las compañías que ofertan equipos basados en sistemas propietarios para aplicaciones específicas de detección y procesamiento de señales de AEs. La mayoría de ellos son para la adquisición multicanal; algunos incluyen procesadores integrados y otros están conectados a un PC externo (Personal Computer). Por lo general son dispositivos modulares que integran fuentes de alimentación, tarjetas de adquisición de datos, procesadores e incluso FPGAs (Field Programmable Gate Array). Ciertas compañías ofrecen sistemas muy específicos orientados a AE (ultrasonidos) como AMSY-6 de Vallen Systeme [1.15] o PowerPAC de Physical Acoustics [1.16]; otras empresas ofrecen sistemas de instrumentación para micrófonos, hidrófonos y vibraciones como LAN-XI de Brüel & Kjær [1.17]; y otras sistemas de adquisición y procesamiento orientados a instrumentación virtual en chasis de instrumentación como el PXI (Peripheral Component Interconnect (PCI) eXtensions for Instrumentation) de National Instruments [1.18]. El sistema de instrumentación propuesto en este trabajo incluye hardware PXI. Además de contar con módulos especializados para el procesamiento y adquisición de señal, las plataformas PXI proporcionan flexibilidad software mediante instrumentación virtual.

Viene siendo importante el esfuerzo dedicado a la investigación y desarrollo alrededor del hardware de monitorización de AEs, tales como los sistemas de adquisición y comunicación de datos. Los principales temas en el campo de las medidas acústicas de PDs también están muy relacionadas con el área de AE, pero están más centradas actualmente en arrays de sensores de



ultrasonidos [1.19-1.20], arrays de sensores de OF y sistemas multicanal de OF [1.21-1.22]. En último término, el objetivo de un sistema automático de monitorización de AEs es la identificación de la AES y su localización, lo cual coincide con el objetivo primordial en el caso de la monitorización de PDs [1.23-1.24].

En un trabajo previo que condujo a la tesis de máster [1.25] se usaron diferentes técnicas de *denoising* de PDs procedentes de medidas eléctricas [1.26] para aplicarlas con medidas acústicas. El principal objetivo de este análisis era reducir el umbral de detección y en este sentido, las más útiles resultaron ser una combinación de técnicas wavelet y filtrado digital paso-banda (WT + BPF). Este sistema de procesamiento obtiene mejoras significativas en entornos ruidosos (eléctricos y acústicos) con señales débiles, permitiendo mejorar también la precisión en la determinación de los TOAs.

El método más utilizado en la localización espacial de la AES es la trilateración [1.27-1.34]. Este proceso determina las posiciones absolutas o relativas de puntos en el espacio mediante la medida de distancias, utilizando para ello la geometría de círculos, esferas o triángulos. Estas distancias se calculan a través de los TOAs que son los tiempos de llegada de la señal acústica a cada sensor. A partir de la información de los TOAs es posible resolver el sistema de ecuaciones de localización. Algunos trabajos previos emplean el sistema de posicionamiento global (Global Positioning System - GPS) para la localización de la AES en transformadores [1.27]. Otros estudios presentan métodos adaptativos [1.28], métodos iterativos [1.29] y métodos no-iterativos [1.33] para abordar este problema.

En esta tesis se propone un sistema de instrumentación multicanal completamente acústico para la detección y localización de AEs procedentes de PDs. Dicho sistema debe basarse en el uso combinado de sensores de OF internos y sensores PZT externos. También debe incluir hardware de acondicionamiento y adquisición de señales acústicas y software para la detección y localización de AEs.

En este punto, surgen dos alternativas. La primera se basa en un sistema totalmente orientado a la instrumentación virtual (Virtual Instrumentation - VI) (LabVIEW) y, posteriormente la segunda incluye el concepto de sistemas híbridos que integran más de un tipo de programación (LabVIEW - Matlab). Este último supera las limitaciones de la VI en la implementación de algoritmos matemáticos complejos, lo que permite plantear requisitos más exigentes para el sistema en cuanto a resolución y precisión en la localización.

Es importante mencionar que la caracterización del sistema de aislamiento en equipos eléctricos HVAC+DC es hoy en día un desafío para la red de transporte de energía eléctrica y

deben demostrarse nuevos sistemas específicos de monitorización de PDs para este tipo de instalaciones. En este sentido, el sistema será ensayado en condiciones reales de HVAC+DC.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de investigación es diseñar e implementar un sistema multicanal de instrumentación para la detección y localización de AEs procedentes de PDs.

Para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un sistema completo de adquisición multicanal para monitorizar señales captadas por sensores acústicos de diferentes tipos.
- Incluir una secuencia de procesamiento de señal empleando técnicas de *denoising* y evaluar su impacto en la mejora de la detección y localización de AEs.
- Analizar diferentes algoritmos de localización, técnicas de medida de TOAs y estrategias de resolución de ecuaciones de localización, y evaluar dos arquitecturas diferentes: simplificada (VI-LabVIEW) y mixta-híbrida (LabVIEW - Matlab).
- Testear el sistema completo con AEs en el Laboratorio de Ensayos Acústicos y con PDs (HVAC-DC) en instalaciones de alta tensión representativas de las condiciones reales de operación.

## 1.3. Estructura de la memoria

Este documento de tesis se divide en tres grandes bloques. En la primera parte se realiza una introducción teórica y el estudio del estado del arte. En el Capítulo 2 se presenta la detección de AEs procedentes de PDs. En primer lugar se habla de la AE en términos generales y después, se enfoca hacia AEs específicas procedentes de PDs. En este capítulo también se describen los sistemas de detección de AEs, incluyendo sensores acústicos (sensores PZT y sensores de OF), equipos de adquisición de datos, métodos de detección basados en umbral y técnicas de reducción de ruido (Filtrado Wavelet y Filtrado Digital Paso-banda).

Esta primera parte también aborda el tema de localización de AEs en el Capítulo 3. Este capítulo comienza explicando el principal algoritmo de localización que es la Trilateración y los

diferentes enfoques para la medida de los TOAs (Tiempos Absolutos, Diferencias de Tiempos y Pseudo-tiempos). El capítulo continúa con la descripción de las técnicas de medida de los TOA (Umbral, Criterio de la Energía, Criterio de Información de Akaike y Correlación Cruzada) y termina con las estrategias para la resolución de las ecuaciones de localización (GPS, basado en Tablas de Búsqueda, Newton-Rapshon, Resolución Matricial y Optimización por Nube de Partículas).

La segunda parte describe la arquitectura y el software de procesamiento para la detección multicanal y la localización de AEs (Capítulo 4). Esta parte proporciona una descripción detallada del software y hardware diseñados e implementados en esta tesis. En primer lugar, se habla del hardware utilizado: los sensores PZT y de OF, el acondicionamiento y el sistema de adquisición. Y luego se tratan en detalle los bloques del software implementado: adquisición, *denoising*, identificación y localización de PDs. En la parte de localización se describen las diferentes arquitecturas seguidas y los diferentes algoritmos de localización implementados.

En la tercera parte, se describen las configuraciones de los experimentos y los resultados de detección y localización de AEs y de PDs (Capítulo 5). Estos experimentos van desde la localización basada en mallado 3D con refinado progresivo, pasando por la localización basada en tablas de diferencias de tiempos de llegada y por la detección de PDs en condiciones de HVAC-DC, hasta la detección y localización de AEs empleando un sistema híbrido.

Por último, en el Capítulo 6 se extraen las conclusiones y se plantea el trabajo futuro. Este capítulo también destaca las contribuciones más importantes de este trabajo de investigación y las publicaciones más relevantes relacionadas con el mismo.

Anexo al final de este documento se incluye un resumen extendido en inglés (*extended summary of the PhD thesis*) que recoge *abstract*, *introduction* y *conclusions* de la tesis, junto con las tres principales publicaciones internacionales.

## 1.4. Proyectos de investigación y colaboraciones

Este trabajo de investigación ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto coordinado: “Sistema de Instrumentación Multicanal para Medida de Descargas Parciales en Campo mediante Integración de Sensores Acústicos y Eléctricos. Aplicación a su Localización y Análisis en Transformadores de Alta Potencia” (No. DPI2009-14628-C03-0, Ene. 2010 – Dic. 2013, Coordinador José A. García Souto).

La beca FPI-MICINN (Formación de Personal Investigador) No. BES-2010-042083 está asociada al 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, Investigador Principal José A. García Souto).

La caracterización de las emisiones acústicas procedentes de PDs en experimentos de HVAC se realizó en el Laboratorio para Investigación y Test de Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid, en colaboración con el Grupo de Diagnóstico de Máquinas Eléctricas y Materiales Aislantes (DIAMAT) del Departamento de Ingeniería Eléctrica, en el contexto del proyecto coordinado (No. DPI2009-14628-C03-0).

Las medidas acústicas de PDs en instalaciones HVDC y HVAC-DC se realizaron en colaboración con el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Bolonia, Italia. La estancia de investigación fue de 3 meses de duración (14 de Septiembre de 2013 – 14 de Diciembre de 2013) bajo la supervisión del Dr. Andrea Cavallini. La estancia también fue financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación y está asociada a la beca FPI-MICINN No. BES-2010-042083.

# Capítulo 2

## DetECCIÓN DE EMISIONES ACÚSTICAS DE DESCARGAS PARCIALES

En este capítulo se realiza una breve introducción a la detección de AEs de PDs. Incluye fundamentos de AE, AE de PDs y sistemas de detección de AE (hardware y software). Adicionalmente se dedica una sección a las principales técnicas de reducción de ruido para esta aplicación.

### 2.1. Emisión acústica

La Emisión Acústica (Acoustic Emission - AE) [2.1-2.2] es el estudio y el uso práctico de las ondas elásticas generadas por un material sometido a un estrés externo. Estrictamente, "acústico" se refiere a las ondas de presión detectadas por el oído. Sin embargo, las ondas elásticas en los sólidos no se limitan a las ondas de presión, ya que todos los tipos de modos de vibración son generados por fuentes de AE. Aun así, el término "AE" se ha convertido casi universalmente usado para los fenómenos de ondas elásticas generadas por un evento interno en un medio. En este caso, "acústico" se referirá a cualquier onda elástica generada por una AES.

Las AEs son ondas acústicas generadas por un cambio rápido en el estado de estrés de una región en un material. Las ondas acústicas son uno de los métodos de transmitir energía a través de un material. Una onda acústica transfiere energía mediante el movimiento de muchos átomos,

por lo que su generación implica, necesariamente, una región grande de átomos. Una onda acústica puede ser tan simple como un impulso de presión en un gas o líquido, o tan complicado como los muchos modos de transmisión en un sólido.

Las ondas acústicas más comunes son las ondas de sonido en el aire y el agua. Estos se producen por la vibración de una superficie tal como el aparato vocal de un animal, una hoja al viento, o un altavoz. Otro tipo de onda acústica es la generada por una alteración repentina en o sobre un material, este evento transitorio produce una onda acústica transitoria. Tal onda transitoria es lo que definimos como AE. La Figura 2.1 muestra las formas de onda, tanto de un evento transitorio como de una superposición de varios eventos transitorios.

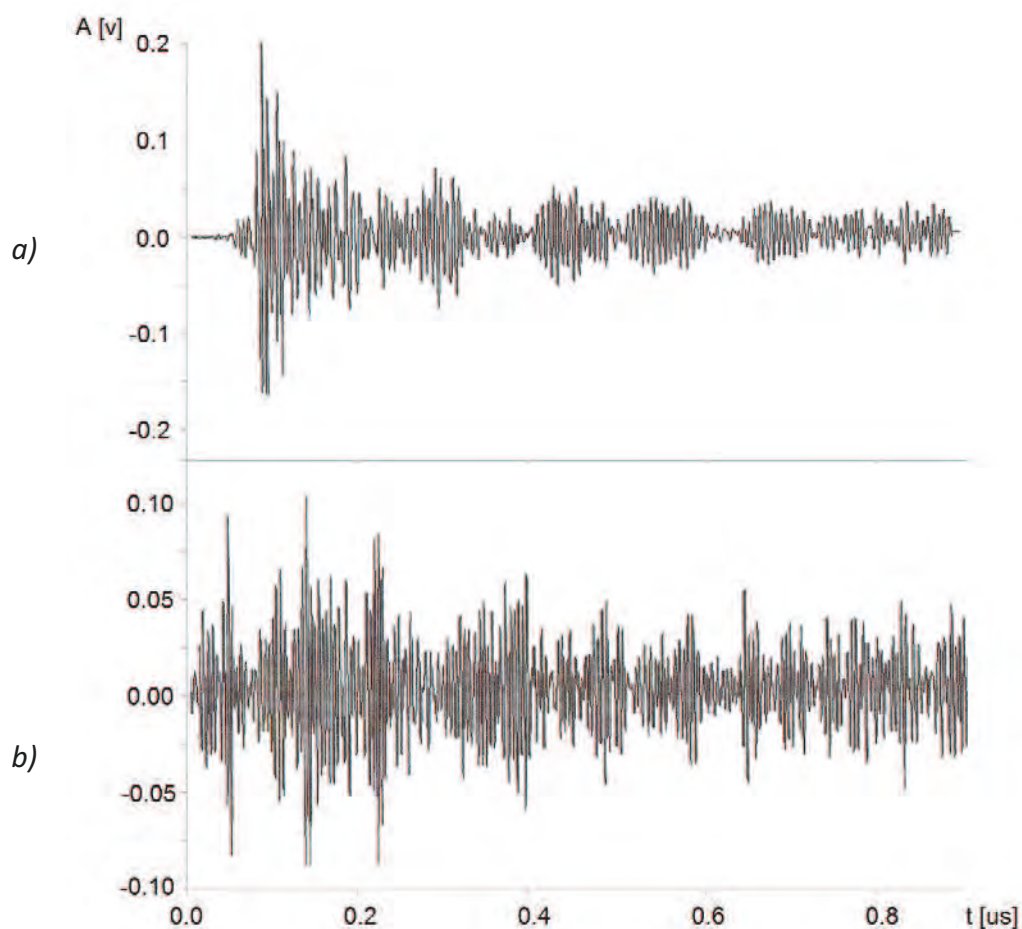
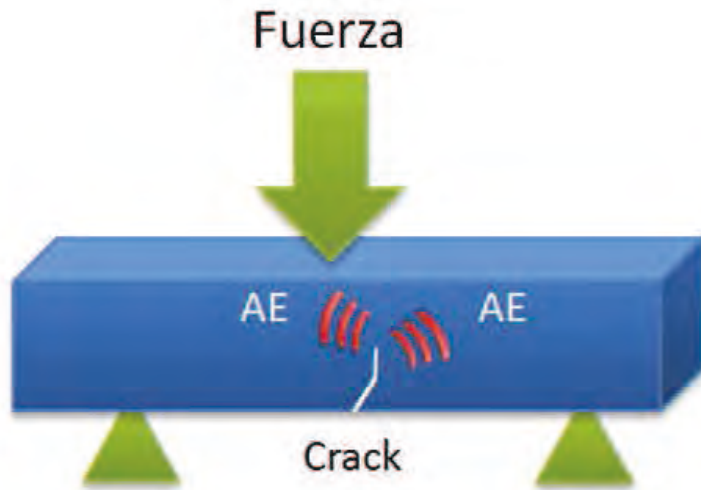


Figura 2.1. Ejemplos de AE en a) y varias AEs superpuestas en b).

La AE es un fenómeno bien conocido en la vida cotidiana: el sonido de cristales rotos, la caída de árboles o grietas de hielo son algunos ejemplos podemos encontrar. Las fuentes generadoras de AE pueden ser de diversos tipos. Por ejemplo, en los metales, las fuentes primarias son las grietas (Figura 2.2), deformaciones plásticas, fracturas y desuniones.



*Figura 2.2. AE provocada por una grieta en un metal.*

Fugas, fricción, golpes, reacciones químicas, descargas eléctricas (PDs) son otros ejemplos de fuentes que generan AEs. Por esta razón, existen infinidad de aplicaciones de detección y localización de AEs, desde la industria de la construcción para la evaluación de defectos en estructuras de metal, hormigón y otros materiales compuestos, la industria aeroespacial para detección de fisuras en el fuselaje, la industria química para la detección de fugas, hasta la industria eléctrica para el análisis de fallos en el aislamiento. De hecho, la medida de AEs procedentes de PDs en transformadores de alta tensión es el caso de estudio central de la tesis doctoral.

La onda elástica generada viaja por todo el material y puede ser detectada a distancias considerables del punto de origen. De este modo, las características de la onda (amplitud, fase, frecuencia, etc.) varían debido al efecto de la dispersión a lo largo de su camino acústico. La información más importante de la AE es el tiempo de llegada (TOA) a cada sensor y la amplitud de la misma. El TOA aporta información de la distancia del evento y la amplitud de su magnitud. Toda esta información obtenida de la onda permite calcular la localización de la AES pero teniendo siempre en cuenta, como se ha dicho anteriormente, que tanto las diferentes trayectorias que sigue la señal hasta alcanzar cada sensor como las propias características del sensor, modifican las características de la señal detectada.

La distancia a la que se puede detectar una AE depende de la intensidad de la señal y de las características acústicas del material por el que se transmite. En ciertos materiales se puede detectar en toda la estructura y en otros sólo en una pequeña región circundante. Sin embargo, es muy habitual recibir interferencias de señales ajenas a las deseadas. Por esta razón, es muy conveniente utilizar diferentes tipos de filtrado con el objetivo de eliminar ruido interferente.

## 2.2. Emisiones acústicas de descargas parciales

Una PD es un fenómeno de ruptura eléctrica que está confinado y localizado en la región de un medio aislante, entre dos conductores que se encuentran a diferente potencial [2.3]. Por ello, las PDs representan un indicador fiable de la degradación de dichos aislantes. De este modo, el estudio de su actividad [2.4] aporta información crucial para la detección y prevención de fallos en equipos eléctricos de alta tensión como transformadores (Figura 2.3).

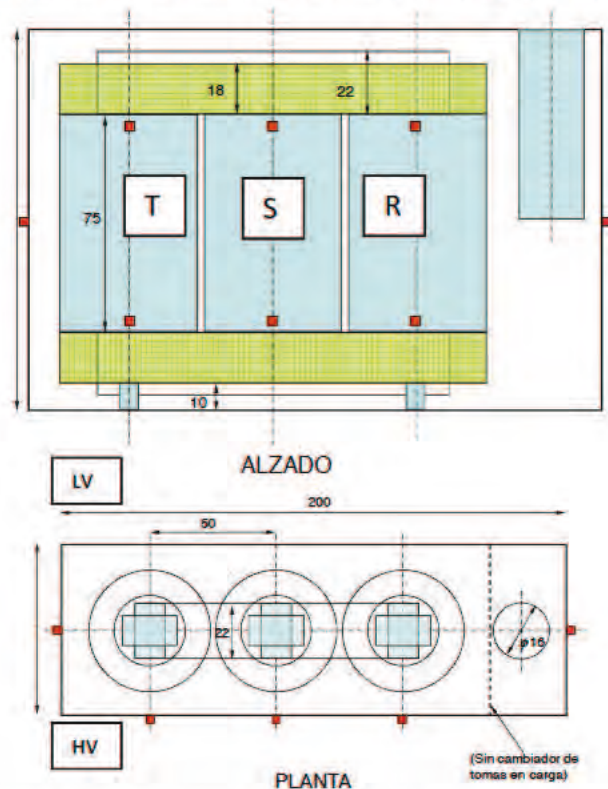


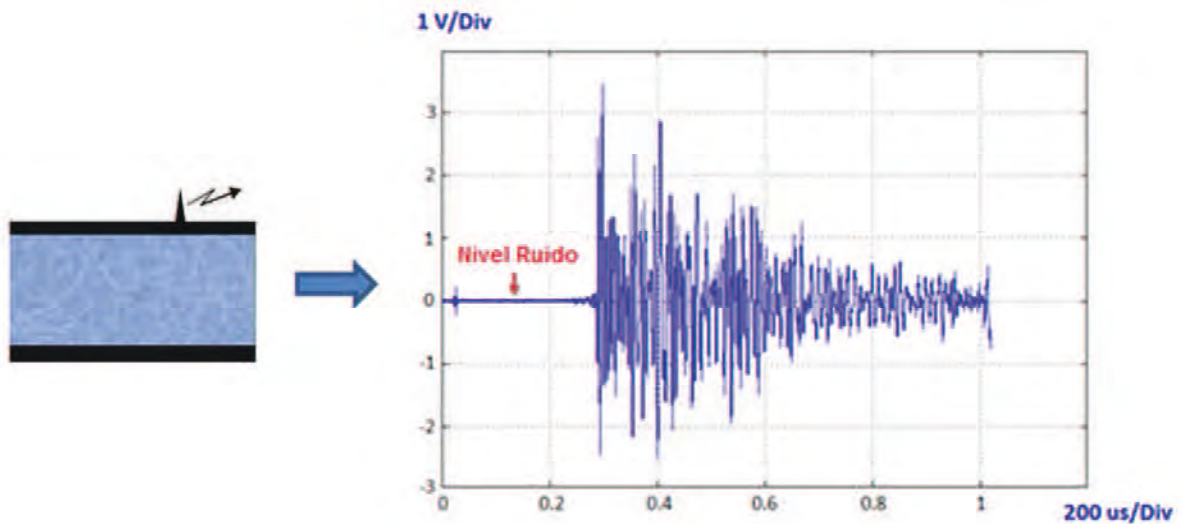
Figura 2.3. Transformador trifásico real (Alzado y Planta en cm).

La localización de la descarga puede ser la consecuencia de un aumento del campo eléctrico en un determinado espacio, relativamente pequeño, comparado con las dimensiones del medio aislante. El aumento del campo puede ser debido a cambios bruscos en la naturaleza del aislante, que pueden ser provocados por vacuolas en un medio sólido o por espacios de gas entre las superficies de un aislante con un conductor o con otro aislante.

Atendiendo a la definición de descarga parcial como un proceso de ruptura dieléctrica, en el cual el arco que se forma entre dos electrodos es de carácter parcial y transitorio, con un tiempo de duración muy corto y de un bajo contenido energético. Las descargas parciales se pueden caracterizar y dividir en tres tipos dependiendo de las propiedades del medio existente entre los electrodos.

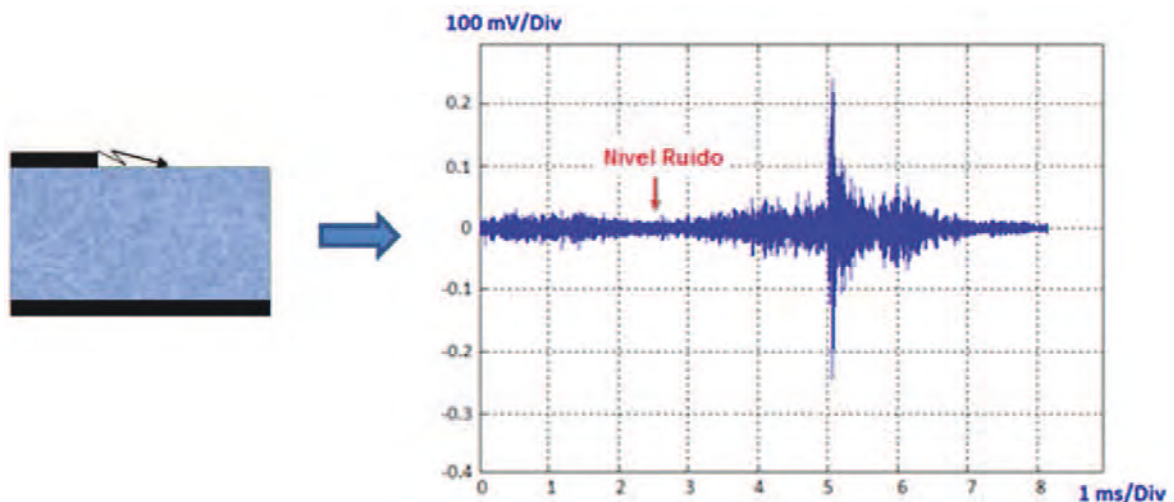


**PDs externas o corona:** Las descargas tipo corona ocurren en zonas afiladas dentro de gases o dieléctricos líquidos sometidas a un fuerte campo eléctrico [2.5]. Son independientes de la distancia entre los electrodos, ya que a un mismo valor de tensión aplicada, un punto afilado a algunos centímetros de tierra causa una descarga similar que un borde afilado de una barra de alta tensión a varios metros sobre el plano de tierra. La Figura 2.4 muestra una AE procedente de una PD corona.



*Figura 2.4. PD corona.*

**PDs superficiales:** En las interfaces de dos medios dieléctricos, casi siempre aislante - aire, pueden aparecer componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad que originan descargas superficiales que se extienden más allá de su lugar de origen [2.6]. La contaminación o humedad en la superficie aislante pueden acelerar la aparición del fenómeno. La Figura 2.5 muestra una AE procedente de una PD superficial.



*Figura 2.5. PD superficial.*

**PDs internas:** Las descargas internas ocurren en oquedades de baja rigidez dieléctrica localizadas en sólidos o en burbujas en los aislantes líquidos. Pueden encontrarse completamente dentro del aislante o en la frontera cercana a alguno de los electrodos. Su origen es debido al fuerte campo eléctrico creado dentro de los defectos [2.7]. La Figura 2.6 muestra una AE procedente de una PD interna.

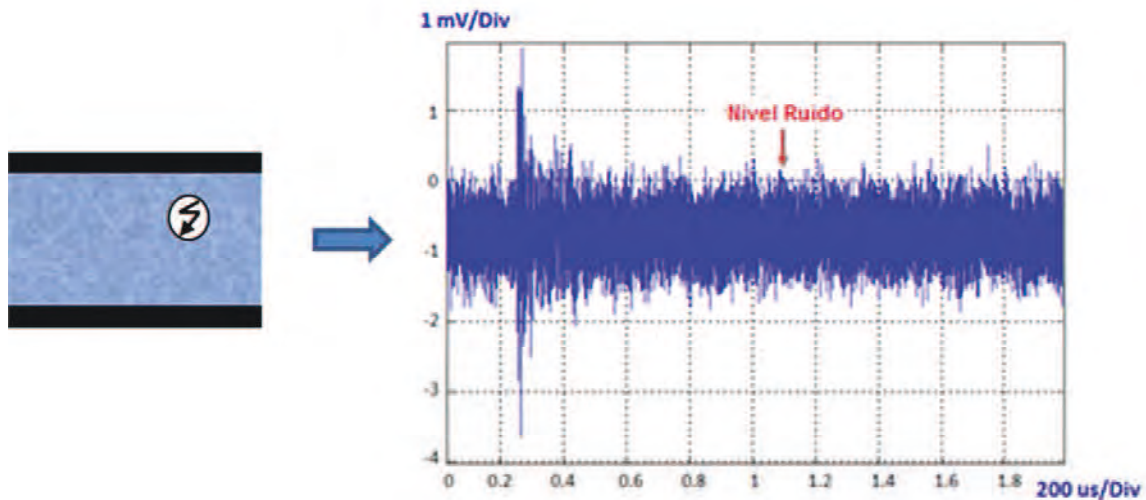


Figura 2.6. PD interna.

El inicio de PDs es un proceso estocástico controlado por:

- Portadores de carga de eventos de descarga anteriores
- Campo externo aplicado
- Propiedades físicas locales (envejecimiento, etc.)

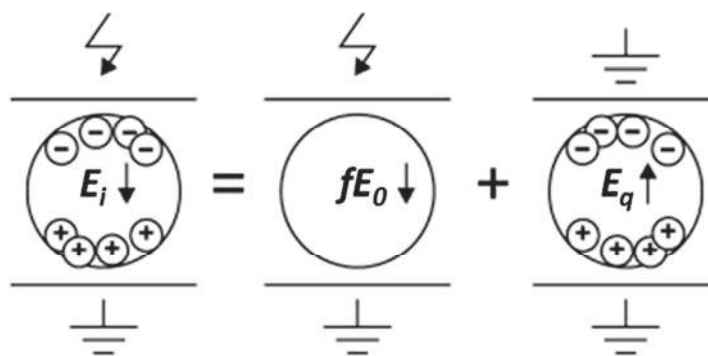


Figura 2.7. Campo eléctrico en una cavidad esférica.

Para que el inicio de descargas se produzca son necesarias dos condiciones: un campo suficientemente alto y la presencia de un electrón de partida. Por ejemplo, el campo eléctrico interno  $E_i$  en una cavidad esférica es el que muestra la Figura 2.7 y la ecuación (1).

$$E_i = fE_0 + E_q \quad (1)$$

donde  $E_q$  es el campo local generado por la distribución de cargas y  $fE_0$  es el campo provocado por la fuente externa. Dado que  $fE_0$  y  $E_q$  tienen signo opuesto, la ecuación (1) queda de la siguiente forma:

$$E_i = fE_0 - E_q \quad (2)$$

El inicio del proceso de descargas (avalancha) se produce cuando el campo interno  $E_i$  alcanza el campo de inicio  $E_{inc}$  (inception field), el valor de este campo depende de las características del material. Durante la avalancha (PDs), el campo local  $E_q$  se incrementa para contrarrestar el campo externo  $fE_0$ , reduciendo así el campo interno  $E_i$ . El mínimo campo para mantener la avalancha es el llamado campo residual  $E_{res}$ . De este modo, la condición de extinción de PDs es la siguiente:

$$E_i = E_{res} \quad \square \quad fE_0 - E_q = E_{res} \quad (3)$$

La Figura 2.8 representa los diferentes campos durante la avalancha.

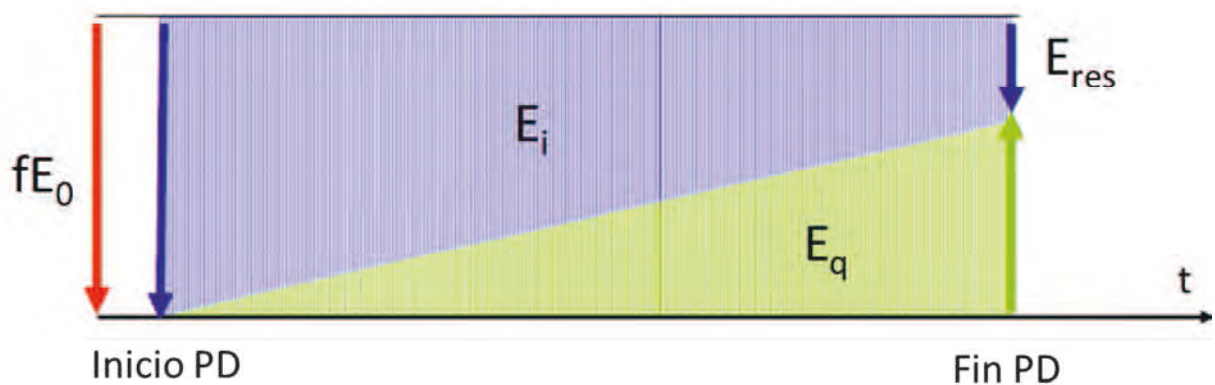


Figura 2.8. Evolución de los diferentes campos desde el inicio hasta la extinción de las PDs.

La Figura 2.9 refleja el proceso de descargas en un ciclo de red.

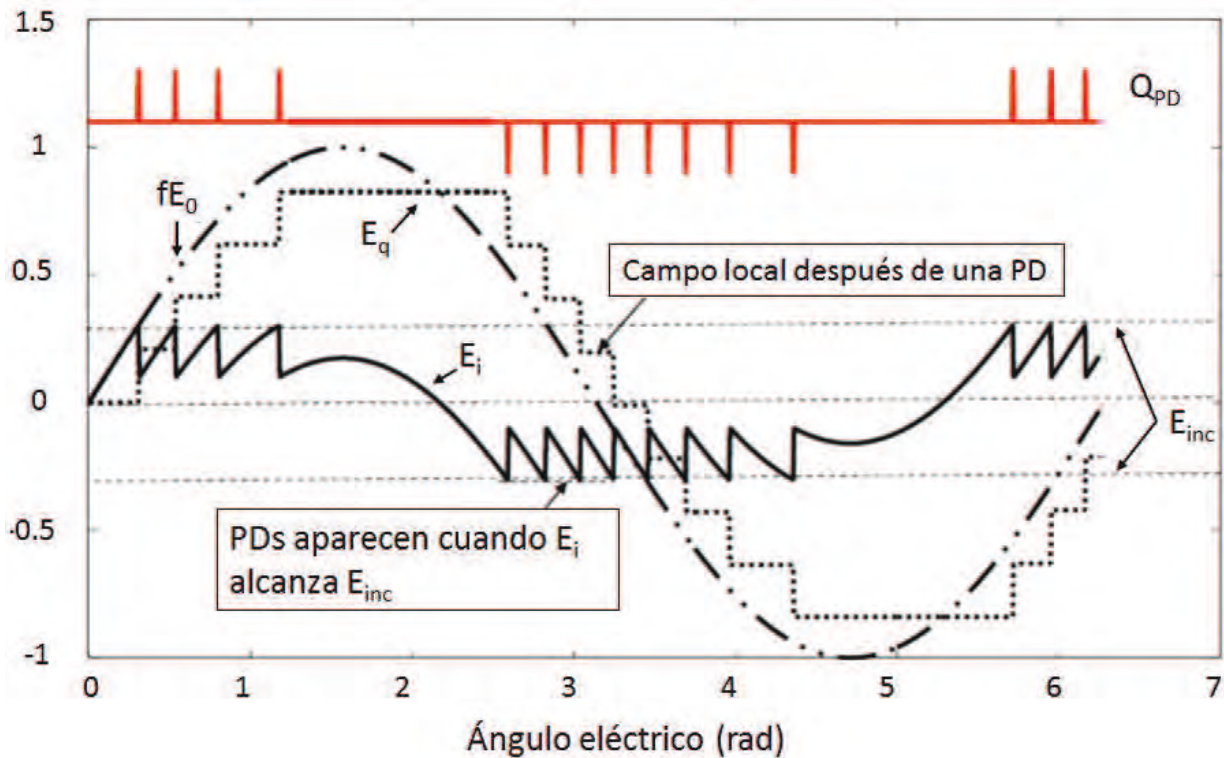


Figura 2.9. Proceso de PDs en un ciclo de red.

## 2.3. Sistemas de detección de emisiones acústicas

Los sistemas típicos de detección de AEs están constituidos por: sensores de detección de señales de AE, acondicionadores y/o amplificadores (amplificaciones típicas son 40 o 60 dB) que adaptan la señal captada por el sensor para su posterior procesamiento, cables que transfieren las señales hasta 300 metros de distancia entre dispositivos (normalmente son cables de tipo coaxial), y sistemas de adquisición de datos que convierten las señales analógicas en digitales y que incluyen todo tipo de procesamiento de señal (análisis de parámetros, filtrado, reducción de ruido (denoising), etc.).

### 2.3.1. Sensores acústicos

Un sensor es un dispositivo que transforma el estímulo provocado por una onda acústica en una señal eléctrica. Los sensores empleados para detección de AE son típicamente sensores piezoeléctricos (PZT). Otros tipos de sensores incluyen transductores capacitivos, interferometría láser. La relación exacta entre las características de la onda acústica y las de la

señal eléctrica dependerá tanto del sensor como de la onda. Un sensor ideal arrojaría una curva tensión-tiempo ( $v/t$ ) idéntica a la curva amplitud-tiempo ( $a/t$ ) de la onda en el punto donde se encuentra el sensor. A pesar de que ningún sensor es ideal, para ciertos tipos de AEs, la interferometría láser se acerca. Debido a la amplia gama de frecuencias y modos acústicos contenidos en una señal de AE, casi cualquier sensor puede detectar alguna de ellas. Sin embargo, disponer del sensor óptimo adecuado a la aplicación supondrá la diferencia entre tener éxito o fracasar en el experimento, sobre todo si hablamos de señales de baja intensidad.

### **2.3.1.1. Sensores piezoeléctricos**

Un sensor piezoeléctrico [2.1-2.2] es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza, transformando las lecturas en señales eléctricas.

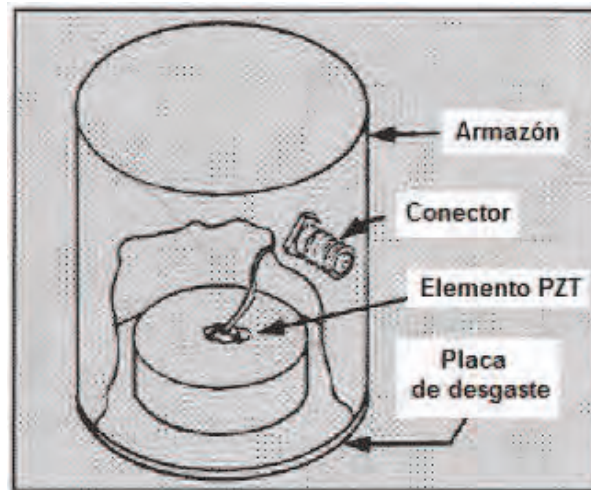
El efecto piezoeléctrico se basa en la capacidad que tienen ciertos cristales para generar una carga eléctrica al ser cargados mecánicamente con presión o tensión, lo cual se denomina el piezoefecto directo. A la inversa, estos cristales también sufren unas deformaciones controladas al ser expuestos a un campo eléctrico, un comportamiento denominado piezoefecto inverso. La polaridad de la carga depende de la orientación del cristal relativa a la dirección de la presión.

En los sensores piezoeléctricos se usan dos grandes grupos de materiales: cerámicos piezoeléctricos y materiales monocristal. El material cerámico (como por ejemplo la cerámica PZT) tienen una sensibilidad constante que es aproximadamente dos órdenes de magnitud más grande que los materiales monocristal y tienen un bajo coste. La sensibilidad de las piezocerámicas se ve degradada con el tiempo y está altamente correlacionada con la temperatura. Los materiales monocristal son menos sensibles (fosfato de galio, cuarzo, turmalina), cuando se manipulan con cuidado, tienen mayor estabilidad a largo plazo.

El PZT es una solución sólida sintetizada de titanato de plomo ( $PbTiO_3$ ) y zirconato de plomo ( $PbZrO_3$ ) que son las cerámicas piezoeléctricas más usadas por su temperatura crítica, por su coeficiente piezoeléctrico y por su relativamente baja temperatura de funcionamiento ( $200\text{ }^\circ\text{C}$ ).

En comparación con otros tipos de sensores acústicos, los sensores PZT proporcionan la mejor combinación de bajo coste, alta sensibilidad, facilidad de manejo y respuesta a frecuencia selectiva (frecuencia de resonancia del sensor). Aunque estos sensores no son adecuados para la detección de banda ancha, son muy prácticos y útiles para la mayoría de los experimentos y aplicaciones de AE.

En la mayoría de los casos, los sensores PZT para detección de AE están constituidos por el elemento piezoeléctrico cubierto por una carcasa de protección como se ilustra en la Figura 2.10. Y la superficie sensible es la llamada placa de desgaste en la figura.



*Figura 2.10. Estructura del sensor PZT.*

En este trabajo de investigación se ha empleado un transductor ultrasónico PZT como el de la Figura 2.11, modelo R15I-AST (Physical Acoustic Corporation) (Anexo I).



*Figura 2.11. Transductor ultrasónico PZT, modelo R15I-AST.*

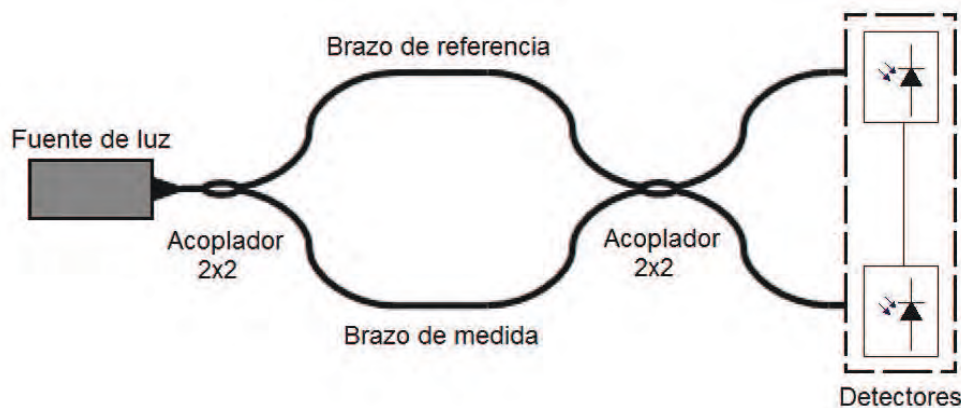
### **2.3.1.2. Sensores de fibra óptica**

En las últimas décadas la OF se ha ido incorporando a la industria de las telecomunicaciones. Con el desarrollo de la optoelectrónica [2.8-2.9], las OFs se empezaron a usar como elementos sensores debido a sus características únicas: gran capacidad de integración, medida remota, alta flexibilidad, bajas pérdidas de propagación, alta sensibilidad, bajo coste de fabricación, alta precisión, capacidad de detección simultánea, inmunidad a interferencias

electromagnéticas, etc. Este tipo de sensores se pueden utilizar para medir temperatura, tensión, presión, rotación, desplazamiento, índice de refracción, polarización, ultrasonidos, y así infinidad de parámetros. De hecho, algunos de estos sensores van incluidos en aeronaves, barcos, puentes y construcciones con innumerables fines. La capacidad de detección de estos sensores ha ido mejorando con el uso de nuevas tecnologías, tales como interferómetros de fibra, fibras microestructuradas, acopladores de fibra especializados, etc. En este trabajo de investigación se emplea un sensor interferométrico de OF por lo que sólo se describirán este tipo de sensores de fibra.

Un interferómetro de OF utiliza la interferencia entre dos haces de luz que se propagan por diferentes caminos ópticos a través de una o dos fibras. Por esta razón, las diferentes configuraciones requieren componentes que dividan y recombinen la luz. Habitualmente, uno de los caminos ópticos está expuesto a la perturbación externa que se desea medir. Dado que los interferómetros arrojan una gran cantidad de información temporal y espectral, la detección se puede llevar a cabo midiendo cambios en la longitud de onda, fase, intensidad, frecuencia, ancho de banda, etc. Por ello, los sensores interferométricos de OF ofrecen un rendimiento notable con un gran rango dinámico, alta precisión y alta sensibilidad.

A continuación se muestran algunos esquemas típicos de interferómetros de fibra óptica para detección acústica [2.8-2.9].



*Figura 2.12. Configuración Mach-Zehnder.*

Mach-Zehnder: El interferómetro Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer - MZI) se ha utilizado comúnmente en diversas aplicaciones de detección debido a sus configuraciones flexibles. Los primeros MZIs poseían dos brazos independientes, que son el brazo de referencia y el brazo de medida, como se muestra en la Figura 2.12. El haz de luz incidente se divide en dos haces (brazo de referencia y brazo de medida) mediante un acoplador de fibra para posteriormente volver a recombinarse mediante otro acoplador. La

luz después de ser recombinada poseerá la componente de interferencia de acuerdo con la diferencia de camino óptico entre los dos brazos. En aplicaciones de detección, el brazo de referencia se mantiene aislado y sólo el brazo de medida queda expuesto al estímulo externo. De este modo, la variación del camino óptico en el brazo de medida, inducida por la onda acústica incidente, será detectada analizando la señal de interferencia.

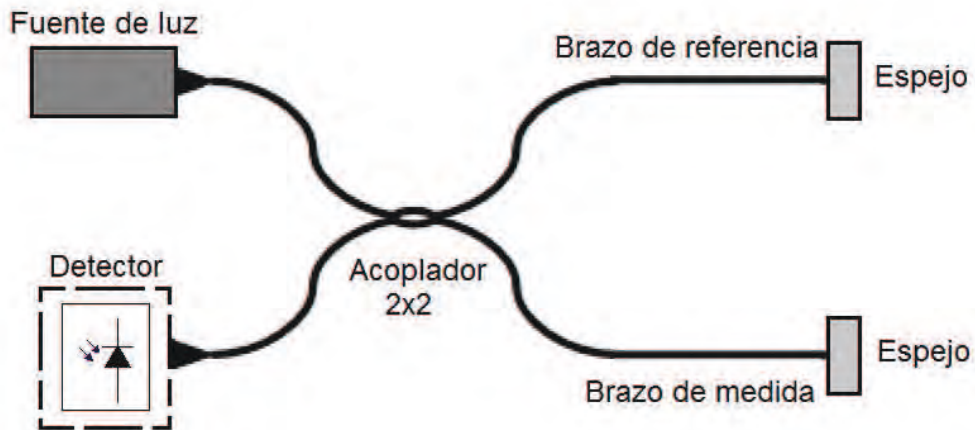


Figura 2.13. Configuración Michelson.

Michelson: El principio básico de funcionamiento del interferómetro Michelson (Michelson Interferometer - MI), al igual que el del MZI, se basa en la interferencia entre los haces de dos brazos. Sin embargo, a diferencia del MZI, estos dos haces se reflejan en el extremo de cada brazo, como se muestra en la Figura 2.13.

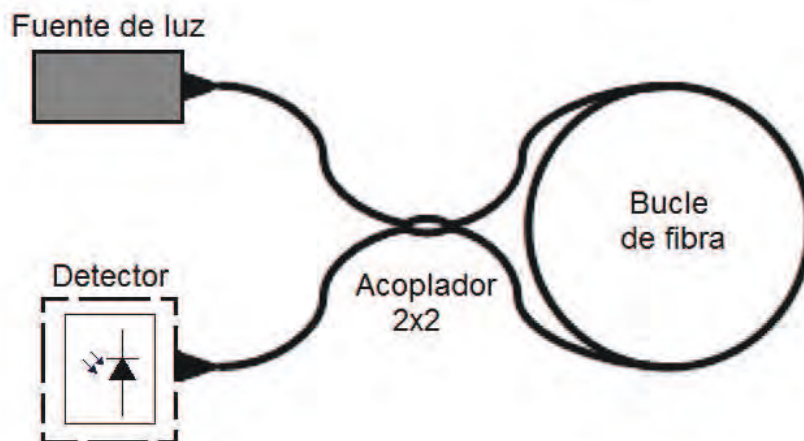


Figura 2.14. Configuración Sagnac.

Sagnac: Los interferómetros Sagnac (Sagnac Interferometer - SI) han suscitado un gran interés en ciertas aplicaciones de detección debido a sus ventajas, como pueden ser:



estructura simple, fácil fabricación, y robustez. Un SI consiste en un bucle de OF, a lo largo del cual se propagan dos haces de luz en direcciones contrarias con diferentes polarizaciones. Como se ilustra en la Figura 2.14, la luz de entrada se divide en dos haces mediante acoplador de fibra para posteriormente ser recombinadas de nuevo en el mismo acoplador. A diferencia de otros interferómetros de OF, la variación del camino óptico se determina mediante la velocidad de propagación, la cual depende de la polarización del modo guiado a lo largo del bucle.

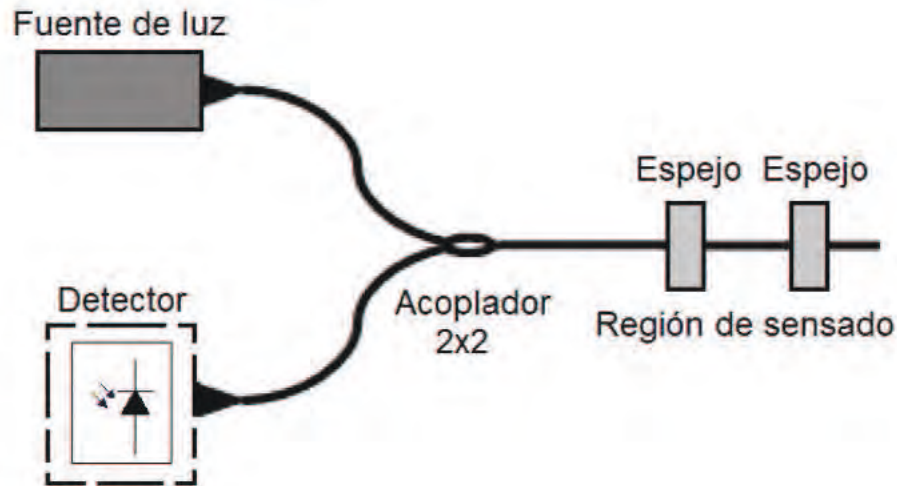


Figura 2.15. Configuración Fabry-Perot.

Fabry-Perot: El interferómetro Fabry-Perot (Fabry-Perot Interferometer - FPI) se compone generalmente de dos superficies de reflexión paralelas separadas por una cierta distancia. La interferencia se produce debido a las múltiples superposiciones de los dos haces reflejados y transmitidos en dos superficies paralelas. En el caso de OF, los reflectores (espejos) pueden ir dentro o fuera de la fibra. La Figura 2.15 muestra un esquema de un interferómetro Fabry-Perot de OF.

En este trabajo se ha empleado una configuración Mach-Zehnder. En este tipo de sensor las señales recibidas en los receptores son dos señales de intensidad óptica en contrafase:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_R + I_M + 2\sqrt{I_R I_M} \cos(\phi_R - \phi_M) \\
 I_2 &= I_R + I_M - 2\sqrt{I_R I_M} \cos(\phi_R - \phi_M)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

donde  $I_R$  y  $\phi_R$  son las intensidad y la fase ópticas de la señal de referencia e  $I_M$  y  $\phi_M$  son las intensidad y la fase ópticas de la señal de medida. Las fases ópticas acumuladas por la luz en su recorrido por el interferómetro vienen dadas por la ecuación (5).

$$\phi = knL = \frac{2\pi}{\lambda} nL \quad (5)$$

donde  $k$  es el número de onda óptico,  $n$  es el índice de refracción del medio,  $L$  la longitud del camino recorrido por la luz y  $\lambda$  la longitud de onda. Por tanto, la variación de fase óptica dependerá de:

$$\frac{\partial \phi}{\phi} = \frac{\partial k}{k} + \frac{\partial n}{n} + \frac{\partial L}{L} \quad (6)$$

donde  $\partial k/k$  es un término relacionado con la variación en la longitud de onda ( $\lambda$ ),  $\partial n/n$  representa la variación en el índice de refracción y  $\partial L/L$  representa la variación en la longitud de la fibra.

Una forma más general de representar la ecuación (4) es:

$$I_{1,2} = I_0 [1 \pm V \cos \Delta\phi] \quad (7)$$

donde  $I_0$  es la potencia óptica media ( $I_R + I_M$ ),  $\Delta\phi$  es la diferencia de fase óptica ( $\phi_R + \phi_M$ ) y  $V$  es un parámetro conocido como visibilidad:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (8)$$

donde  $I_{max}$  es la máxima intensidad registrada en la señal de interferencia e  $I_{min}$ , la mínima.

### 2.3.2. Sistemas de adquisición

En el campo de la detección acústica existen varias empresas que ofertan sus equipos informatizados de adquisición multicanal paralela de señales de AE. Algunos de ellos incluyen procesador integrado y otros van conectados a un PC (Personal Computer) externo. Normalmente son equipos modulares que permiten integrar fuentes de alimentación, tarjetas de adquisición, FPGA (Field Programmable Gate Array) e incluso procesadores. A continuación se mostrarán algunos ejemplos.

La Figura 2.16 muestra un equipo de la empresa Vallen Systeme (AMSY-6).



*Figura 2.16. AMSY-6 de Vallen Systeme.*

La Figura 2.17 muestra un equipo de la empresa Physical Acoustics (PowerPAC).



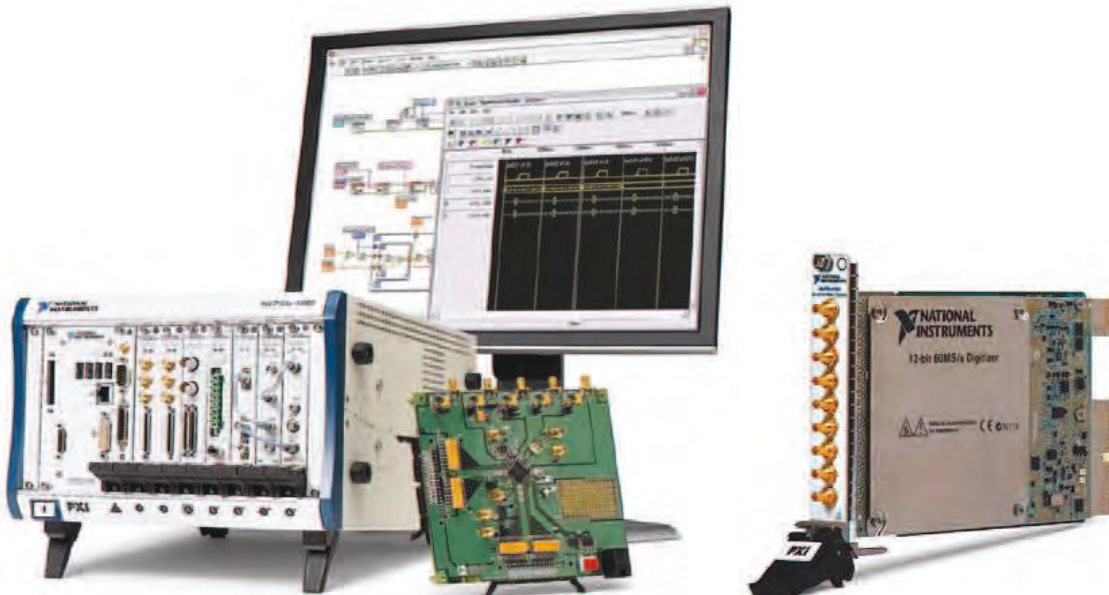
*Figura 2.17. PowerPAC de Physical Acoustics.*

La Figura 2.18 muestra un equipo de la empresa Brüel & Kjær (LAN-XI).



*Figura 2.18. LAN-XI de Brüel & Kjær.*

La Figura 2.19 muestra un equipo de la empresa National Instruments (PXI). Todas las medidas de esta tesis doctoral se han realizado con este dispositivo.



*Figura 2.19. PXI de National Instruments.*

### 2.3.3. Métodos de detección de emisiones acústicas

El método más comúnmente utilizado para la detección de señales acústicas se basa en la discriminación por umbral (Figura 2.20). El estándar IEEE Std C57.127 [2.10] emplea esta técnica para detectar AEs de PDs. En la detección por umbral, cuando las señales exceden un valor fijo predefinido o un nivel de amplitud con respecto al ruido, se activa el sistema de adquisición y procesado de señales. Además del umbral existen otros métodos de detección basados en análisis estadísticos y espectrales.

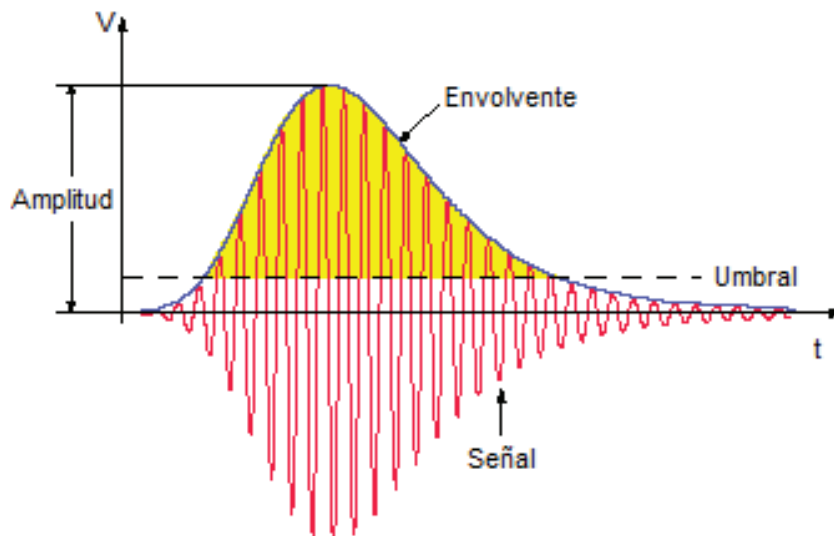


Figura 2.20. Detección por umbral.

## 2.4. Técnicas de reducción de ruido (*denoising*)

Las AEs son señales de ocurrencia aleatoria en el tiempo cuya única característica común es que son transitorios. Uno de los principales problemas en las pruebas de AE es el ruido no deseado [2.2]. El ruido se define como cualquier señal detectada por el sistema de AE que no es una respuesta deseada del estímulo aplicado. Esto incluye todo tipo de interferencia y señal acústica que no estén producidas por el estímulo, así como respuestas no deseadas del estímulo aplicado. En el pasado, el ruido electrónico ha sido un problema importante. Incluso las señales transitorias, si se producen con la suficiente rapidez, se pueden superponer y aparecen como una señal continua. Se ha mejorado la respuesta al ruido eléctrico incluyendo blindaje en sensores y preamplificadores, usando cables coaxiales de doble apantallado cuando sea necesario y mejorar

el filtrado en sistemas de alimentación. Estas medidas han eliminado la mayor parte de las interferencias procedentes de estaciones de radio y televisión, sistemas de encendido de motores de combustión interna, y señales extrañas en líneas eléctricas de entrada. Sin embargo, se encuentran a menudo problemas con bucles de tierra en cables de AE y malas conexiones de alimentación en los centros de trabajo. Casi cualquier área industrial puede tener fuentes inesperadas de ruido eléctrico, lo que no sería un problema si no se están buscando señales de banda ancha.

Dado el carácter aleatorio de la AEs y al no poseer características definidas, excepto su origen transitorio, no son muchos los métodos tradicionales de denoising aplicables a estas señales. El filtrado de banda estrecha, los bloqueadores de frecuencias, y el inventariado temporal predefinido o bien no funcionan o eliminan señales deseadas. La mayoría de las señales de AE, con la excepción de los terremotos, contienen energía por encima de  $30\text{ kHz}$ . Por esta razón, se evitan las frecuencias inferiores a  $30\text{ kHz}$ . Sin embargo, existe un ruido interferente asociado a la emisión magneto-acústica llamado ruido Barkhausen, cuya frecuencia se encuentra en torno a los  $50\text{ kHz}$ . Por lo que los filtros paso-bajo usados deben eliminar también esa frecuencia.

Generalmente, las señales electromagnéticas son muy cortas y a menudo poseen un solo pico. Por el contrario, la mayoría de las señales acústicas poseen varias oscilaciones. Por esta razón, si se filtran todas las señales con un sólo pico, por lo general, no se elimina ninguna señal acústica importante. Otro filtrado útil es el de duración de la señal. Suponiendo que una señal acústica tiene más de tres ciclos de la frecuencia dominante, se podrían filtrar las señales más cortas que  $30\ \mu\text{s}$  para una frecuencia de  $100\text{ kHz}$ , o  $10\ \mu\text{s}$  para una frecuencia de  $300\text{ kHz}$ .

Otro problema es el ruido acústico no deseado. Los impactos sobre ciertas superficies pueden generar grandes señales, por ejemplo la señal acústica provocada por una tormenta de lluvia golpeando los raíles de la vía del tren pueden alcanzar al sensor situado a cierta distancia del origen. Cualquier prueba que implique movimiento, como la rotación de un rodamiento o el movimiento de una pala de un aerogenerador, va a generar algunas señales acústicas de tipo continuo. La mayor parte de estas señales estarán por debajo de los  $50\text{ kHz}$ , por lo que serán eliminadas por el filtro paso-bajo en el canal de señal. Toda aquella señal, tanto del rodamiento como de la pala del aerogenerador, que supere este filtro indicará que ha habido algún problema.

Los métodos de reducción de ruido más efectivos y más comúnmente utilizados con las AEs emitidas por PDs, caso de estudio central de este trabajo de investigación, son el filtrado paso-banda y el filtrado wavelet.

### 2.4.1 Filtrado paso-banda recomendación IEEE Std c57.127

Dentro del Apartado 6 del estándar (IEEE STD C57.127-Ap. 6.8) se propone el uso de un filtro pasa-banda (Figura 2.21) para eliminar todas aquellas vibraciones ajenas a las producidas por las PDs [2.10]. Estas incluyen las vibraciones causadas por bombas, ventiladores y otros elementos. La mayoría de ellas se encuentran por debajo de  $30\text{ kHz}$ , sin embargo, el ruido Barkhausen (relacionado con la emisión magneto-acústica) se encuentra en torno a los  $50\text{ kHz}$ . Por esta razón, recomienda un filtro paso-banda con un ancho de banda de  $200\text{ kHz}$ . Cuando se utiliza con un sensor de  $150\text{ kHz}$ , la frecuencia de corte inferior debe ser de  $100\text{ kHz}$  y la frecuencia de corte superior será de aproximadamente  $300\text{ kHz}$ . La sección paso-alto del filtro debe presentar como mínimo una atenuación de  $48\text{ dB/octava}$  ( $240\text{ dB/década} - \text{Orden } 8$ ). Esto significa que, en relación con la señal de interés ( $150\text{ kHz}$ ), una señal de  $50\text{ kHz}$  se atenuará  $48\text{ dB}$ . En el caso de la sección paso-bajo, la atenuación no debe ser inferior a  $24\text{ dB/octava}$  ( $120\text{ dB/década} - \text{Orden } 4$ ) para que una señal de  $600\text{ kHz}$  se atenúe  $24\text{ dB}$ .

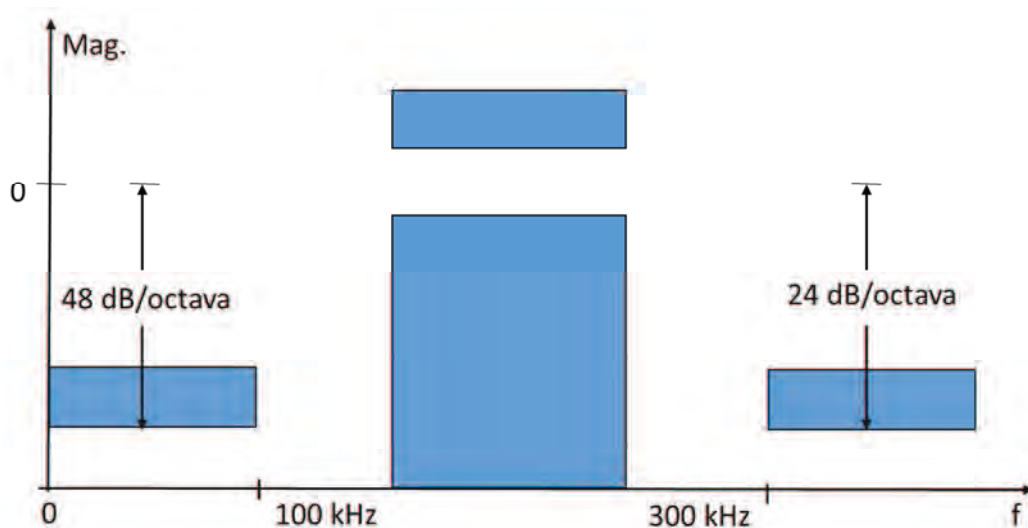


Figura 2.21. Filtro paso-banda IEEE.

### 2.4.2 Filtrado wavelet

La wavelet (WT) es una técnica de enventanado que esta permite el análisis de la señal a diferentes frecuencias y con diferentes resoluciones [2.11].

La función base se llama función WT madre. Dicha función tiene corta duración y es asimétrica, esta se usa para aproximar la señal en un proceso que implica una suma de desplazamientos y escalado de la WT madre. La elección de la WT madre viene determinada por la aplicación en la que será utilizada.

Las WTs satisfacen:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (9)$$

donde  $\Psi(t)$  es la función WT madre.

En el contexto de PDs, una wavelet representa una función localizada en un tiempo  $b$  y a una escala  $s$ . Por lo que se creó una familia de WTs continuas para el escalado y la traslación:

$$\Psi_{s,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \Psi\left(\frac{t-b}{s}\right) \quad (10)$$

donde  $s$  es el parámetro de escalado,  $b$  el de traslación y  $1/\sqrt{|s|}$  un factor usado para garantizar que cada escalado WT tiene la misma energía que la  $\Psi(t)$  original.

La transformada wavelet continua (Continuous Wavelet Transform - CWT) una función,  $f(t)$ , es:

$$W_f(s,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi_{s,b}(t) dt \quad (11)$$

La WT permite la localización en tiempo vía traslaciones de la WT madre y en frecuencia vía dilaciones (retardos).

Sin embargo, el cálculo de los coeficientes de la CWT implica la generación de muchos datos, por eso se usa la discretización de la CWT: Discrete Wavelet Transform (DWT).

Aplicar la transformada wavelet discreta (DWT) sobre la señal en estudio implica hacerla pasar por un banco de filtros digitales en cascada con operaciones de submuestreo, obteniéndose a la salida dos componentes. Una primera componente, conocida como coeficientes de aproximación wavelet, contiene las componentes de baja frecuencia de la señal de entrada, y no es más que una representación de la señal a baja resolución. La segunda componente, conocida como coeficientes de detalles, contiene las componentes de alta frecuencia de la señal. En estas componentes se encuentran los detalles que caracterizan a la señal de entrada así como también las componentes de ruido que se suman inevitablemente durante el proceso de adquisición. Analíticamente, la transformada wavelet discreta de la señal  $f(t)$  se reduce a las siguientes expresiones:



$$\begin{aligned}
c(t) &= \sum_k g(k) \cdot f(k + 2t) \\
d(t) &= \sum_k h(k) \cdot f(k + 2t)
\end{aligned}
\tag{12}$$

donde  $g(k)$  son los coeficientes del filtro paso-bajo y  $h(k)$  son los coeficientes del filtro paso-alto. Como se puede observar en la ecuación (12), además de la operación de convolución típica en un proceso de filtrado, existe una operación de submuestreo implícito. Es decir, solo una de cada dos muestras se mantiene a la salida del filtro. Esta operación de submuestreo no produce pérdida de información relevante de la señal, dado que las señales a la salida del filtro contienen la mitad de la frecuencia de la señal de entrada, por consiguiente su frecuencia de muestreo puede reducirse a la mitad. Así se evita redundancia en la representación, consiguiéndose a la salida de la descomposición wavelet los coeficientes de aproximación  $c(t)$  y de detalles  $d(t)$ , de tamaño igual a la mitad del tamaño de la secuencia de entrada.

La ecuación (12) define un primer nivel de descomposición de la transformada wavelet. Niveles sucesivos de descomposición se obtienen al aplicar progresivamente las operaciones de filtrado sobre la señal que resulta a la salida del filtro paso-bajo. Específicamente:

$$\begin{aligned}
c_{j+1}(t) &= \sum_k g(k) \cdot c_j(k + 2t) \\
d_{j+1}(t) &= \sum_k h(k) \cdot c_j(k + 2t)
\end{aligned}
\tag{13}$$

donde  $c_{j+1}$  y  $d_{j+1}$ : coeficientes wavelets de aproximación y de detalles en la escala  $j+1$ , respectivamente. En la medida que se avanza en la descomposición se consiguen representaciones de la señal de entrada a distintas resoluciones. Así, para  $j=0$  se tiene la resolución original de los datos de entrada, es decir  $c_0(t) = f(t)$ . A medida que  $j$  aumenta la resolución disminuye progresivamente. La Figura 2.22 muestra el esquema de la transformada wavelet discreta mediante un proceso de filtrado sucesivo, presentándose, en este caso, tres niveles de descomposición. El símbolo  $2\downarrow$  denota la operación de submuestreo por un factor de dos,  $CA_j$  y  $CD_j$  representan los coeficientes de aproximación y de detalles, respectivamente, al  $j$ -ésimo nivel de descomposición.

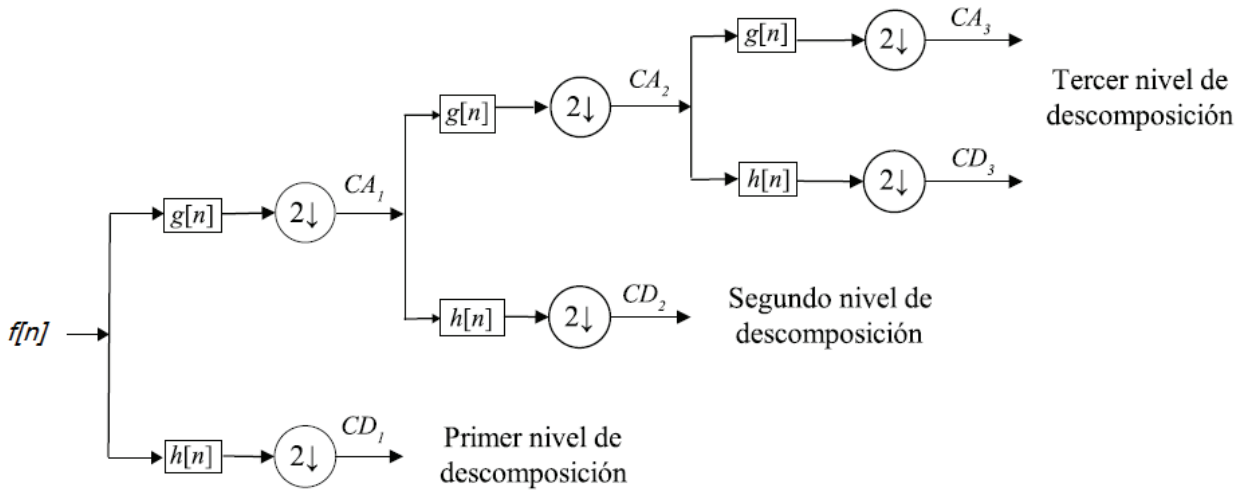


Figura 2.22. Estructura del banco de filtros de análisis wavelet.

Al igual que otras transformadas, la transformada wavelet es reversible (IDWT - DWT inversa); es decir, a partir de los coeficientes wavelets de aproximación  $c(t)$  y de detalles  $d(t)$ , es posible reconstruir la señal de entrada original mediante operaciones de filtrado paso bajo y paso alto. Esto es cierto si la wavelet satisface la propiedad de reconstrucción perfecta, condición que impone ciertas restricciones a los coeficientes de los filtros paso-alto y paso-bajo. En forma más general, la señal en la  $j$ -ésima resolución puede reconstruirse a partir de los coeficientes de detalles y de aproximación de la resolución  $(j + 1)$ -ésima de la siguiente forma:

$$c_j(n) = \sum_k c_{j+1}(k) \cdot g_1(n - 2k) + d_{j+1}(k) \cdot h_1(n - 2k) \quad (14)$$

donde  $g_1(n)$  y  $h_1(n)$ : coeficientes de los filtros de reconstrucción paso-bajo y paso-alto, respectivamente.

Las WTs se usan para discriminar las AEs de PDs del ruido en datos obtenidos online. El objetivo es suprimir el ruido y recuperar la señal verdadera.

El método empleado es el propuesto por Donoho-Johnstone [2.12]:

- 1) Calcular la DWT de la señal ruidosa, eligiendo adecuadamente el número de niveles de descomposición y la WT madre.
- 2) Calcular el umbral para eliminar o reducir elementos en los coeficientes wavelet que caracterizan el ruido.
- 3) Reconstruir la señal con la IDWT (DWT inversa) después de aplicar el umbral y así obtener la señal libre de ruido.

La efectividad de este método depende de la elección de la función base (WT madre), de la función umbral y de los niveles de descomposición

Existen dos versiones de umbral, un umbral duro (*hard threshold*) y un umbral blando (*soft threshold*) como se muestran en la Figura 2.22. En el umbral duro se eliminan todos los coeficientes que se encuentren por debajo de cierto umbral:

$$\delta_{\lambda}(t) = \begin{cases} f(t) & \text{si } |f(t)| > \lambda \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad (15)$$

donde  $f(t)$  es la señal analizada y  $\lambda$  el umbral elegido.

El umbral suave es una extensión del duro, en esta versión se eliminan los coeficientes que se encuentran por debajo del umbral y el resto de ellos se envían a un valor determinado:

$$\delta_{\lambda}(t) = \begin{cases} f(t) - \lambda \cdot \text{sgn}(f(t)) & \text{si } |f(t)| > \lambda \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad (16)$$

Como podemos apreciar en la Figura 2.23 el umbral duro crea discontinuidades  $f(t)=\pm\lambda$  y el suave no.

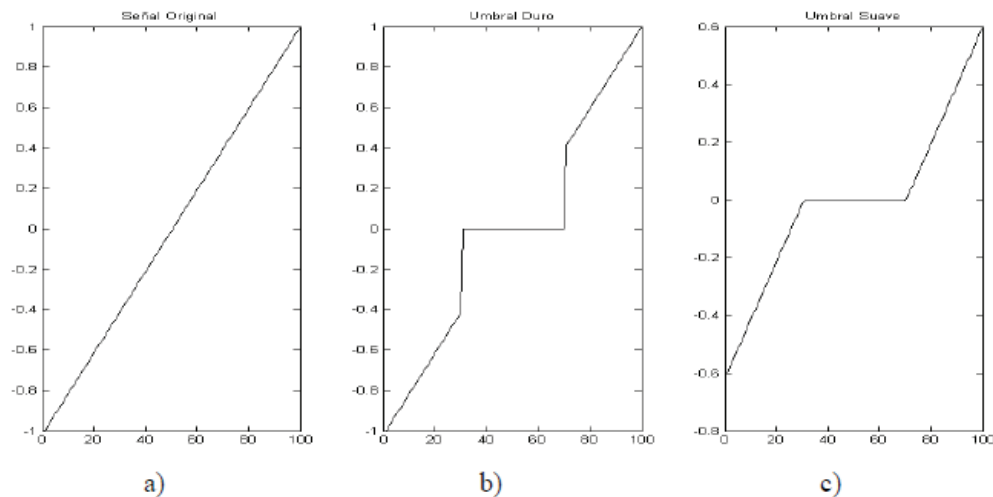


Figura 2.23. Señal original a), umbral duro b) y umbral blando c).

Los algoritmos de elección de umbral más representativos son: Universal, Minimax, Rigorous SURE y Hybrid SURE. Estos algoritmos calculan el umbral a partir de la desviación típica del ruido.

## 2.5. Conclusiones

En este trabajo de investigación se plantea un sistema de instrumentación de detección de AEs que contenga hasta seis sensores PZT y un sensor de OF. El sistema posee hardware específico de acondicionamiento y adquisición multicanal (PXI - National Instruments), lo que permite monitorizar y procesar varias señales procedentes de AEs de forma simultánea. El sistema también incluye software de procesamiento de señal para detectar adecuadamente estas señales y determinar los TOAs. Dicho software emplea la técnica de detección por umbral e incluye una secuencia de denoising (WT+BPF) que reduce el umbral de detección y mejora la precisión en la determinación de los TOAs.

# Capítulo 3

## Localización de emisiones acústicas

Este capítulo se centra en la localización de AEs. En él se exponen, se explican y se analizan diferentes algoritmos de localización, los principales métodos de medida de tiempos de llegada y las estrategias de resolución de ecuaciones de localización.

### 3.1. Algoritmos de localización

Las dos principales alternativas en la localización de AE son: Por un lado, el análisis de las alteraciones de la amplitud de la señal o de las deformaciones de la misma a lo largo del camino de propagación puede darnos una idea de la ubicación de la fuente de emisión, y por otro lado, también se puede determinar el emplazamiento de la fuente midiendo los tiempos de llegada (TOAs).

El proceso de localizar en una dimensión se denomina localización lineal, y en dos o tres dimensiones recibe el nombre de trilateración. Un ejemplo de localización lineal sería la localización de grietas o fisuras en una tubería, columnas, cables, etc. [3.1]. La Figura 3.1 y la ecuación (17) muestran el proceso de localización lineal de una grieta en una tubería.



Figura 3.1. Localización lineal de la AES en una tubería.

$$d = \frac{1}{2}(D - \tau \cdot v) \quad (17)$$

donde  $d$  es la distancia de la AES al primer sensor,  $D$  es la distancia entre los sensores,  $v$  la velocidad del sonido en el medio y  $\tau$  es la diferencia de tiempos de llegada (Time Difference Of Arrival - TDOAs).

Si la aplicación requiere una localización dos o tres dimensiones es necesario aplicar la trilateración.

### 3.1.1. Trilateración

Existen dos tipos de trilateración [3.2]. La primera de ellas es la trilateración 2D que permite encontrar una AES en el plano XY, un ejemplo de aplicación es la localización en interiores [3.3]. Y la segunda es la trilateración 3D que permite encontrar una AES en el sistema de coordenadas X, Y y Z, una de sus aplicaciones es la localización de PDs en transformadores de alta tensión [3.5-3.13].

La trilateración 2D se usa para localizar AES que se encuentran en una superficie. Para que la localización sea efectiva se debe disponer de las posiciones de los sensores y de las distancias entre los sensores y la AES bajo estudio. La Figura 3.2 muestra una trilateración 2D, donde el punto rojo representa la AES con ubicación desconocida, los nodos de referencia (sensores) están etiquetados como  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ , y las distancias entre los nodos de referencia y la AES buscada como  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$ . La intersección de las circunferencias con centro en cada nodo representa la ubicación de la AES.

La AES emite una señal y los nodos de referencia (sensores) medirán la intensidad de esa señal y/o otros parámetros que permitan transformarlos en distancias. La desventaja de este método es que estos parámetros están sujetos a interferencias (otras señales, humedad,

temperatura, objetos, etc.), por tanto, a pesar de que haya técnicas de procesamiento que permiten afinar la conversión a distancias, siempre habrá un pequeño error.

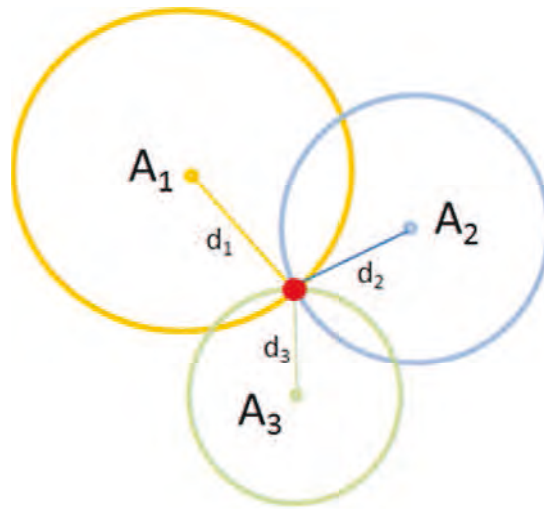


Figura 3.2. Trilateración 2D.

Una vez hayan sido calculadas las distancias, se usa la trilateración 2D para localizar la AES. A continuación se muestra el sistema de ecuaciones de trilateración 2D:

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= d_3^2
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

donde  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas de los nodos  $A_i$  y  $d_i$  las distancias entre los nodos y la AES.

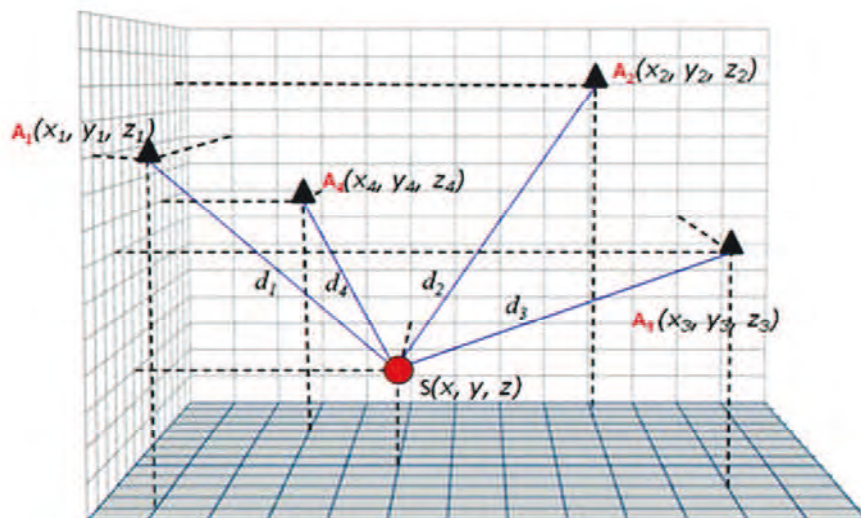


Figura 3.3. Trilateración 3D.

Dado que en determinadas aplicaciones la altura a la que se encuentra la AES resulta determinante, se necesita incluir una tercera dimensión Z. Para ello, se añade un cuarto nodo (sensor) como se puede ver en la Figura 3.3. El sistema de ecuaciones cuadráticas de trilateración 3D es similar al de trilateración 2D:

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= d_1^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= d_2^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= d_3^2 \\
 (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 &= d_4^2
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

donde  $(x_i, y_i, z_i)$  son las coordenadas de los nodos  $A_i$  y  $d_i$  las distancias entre los nodos y el AES.

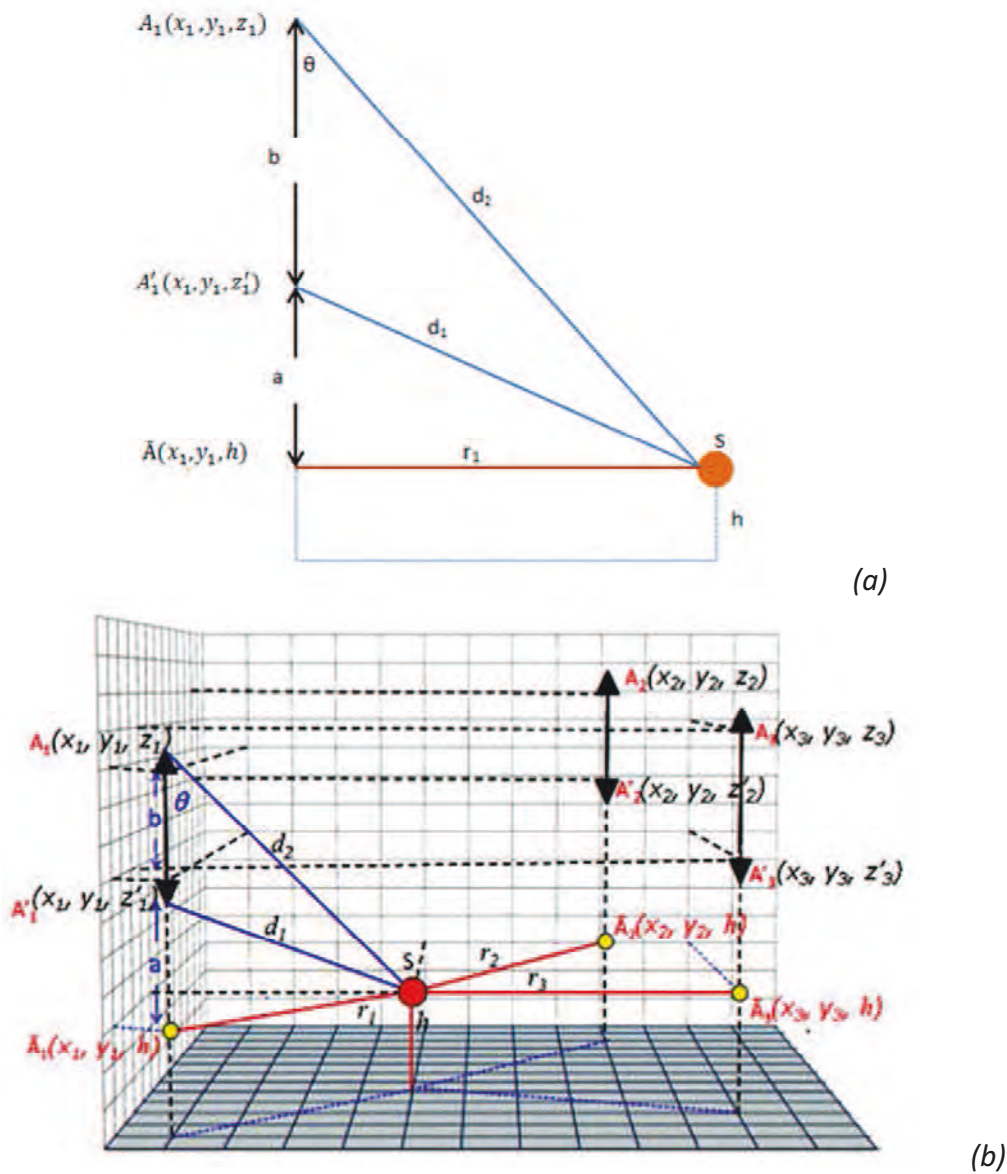


Figura 3.4. Diagramas de COLA: a) 2D y b) 3D.



La trilateración 2D y 3D tienen sus pros y sus contras: La trilateración 3D necesita un nodo más para poder determinar la coordenada Z, sin embargo con un nodo más la localización 2D incrementa su precisión. La trilateración 3D es más compleja y menos precisa que la 2D. El grado de complejidad del sistema incrementa el tiempo de cálculo, y esa es otra de las ventajas que tiene la trilateración 2D sobre la 3D. No obstante, existe una forma de realizar trilateración 3D mediante la expansión de trilateración 2D, a esta aproximación se le llama COLA (Complexity Reduced 3D Trilateration Localization Approach).

El método COLA es una aproximación que permite reducir el coste computacional del sistema, sin embargo obliga a añadir tres nodos de referencia (sensores) más. Estos nodos deben emparejarse con los otros tres, compartiendo las mismas coordenadas XY pero con distinta Z. Por tanto, los nodos iniciales  $A_i (x_i, y_i, z_i)$  se complementan con los nuevos  $A'_i (x'_i, y'_i, z'_i)$  para implementar este método como se muestra en la Figura 3.4. A continuación se describen las operaciones geo-trigonométricas que permiten reducir el sistema de 3D a 2D:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{a+b}{d_2} \quad \square \quad a+b = d_2 \cos \theta \\ &\quad \square \quad a = d_2 \cos \theta - b \end{aligned}$$

$$r_1^2 = d_1^2 - a^2 = d_1^2 - (d_2 \cos \theta - b)^2$$

$$\begin{aligned} d_2^2 &= r_1^2 + (a+b)^2 & (20) \\ &= d_1^2 - (d_2 \cos \theta - b)^2 + (d_2 \cos \theta)^2 \\ &= d_1^2 + 2b \cdot d_2 \cos \theta - b^2 \quad \square \quad \cos \theta = \frac{d_2^2 - d_1^2 + b^2}{2b \cdot d_2} \end{aligned}$$

$$a+b = d_2 \cos \theta = \frac{d_2^2 - d_1^2 + b^2}{2b}$$

De este modo, se pueden obtener  $h$  y  $r_i$  con las siguientes expresiones matemáticas:

$$\begin{aligned} h &= z_i - (a+b) = z_i - \frac{d_2^2 - d_1^2 + b^2}{2b} \\ r_i &= d_2 \cdot \text{sen} \theta = \sqrt{d_2^2 \cdot (1 - \cos^2 \theta)} = \frac{\sqrt{D}}{2b} \end{aligned} \quad (21)$$

donde:

$$\begin{aligned}
 b &= z_i - z'_i \\
 D &= -d_1^4 - d_2^4 - b^4 + 2b^2d_2^2 + 2b^2d_1^2 + 2d_1^2d_2^2
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Una vez calculadas las distancias  $r_i$  el problema se reduce a una trilateración 2D:

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= r_1^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= r_2^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= r_3^2
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Solucionando el sistema 2D se obtienen las coordenadas  $x$  e  $y$ , que junto a  $h$  resuelven la localización 3D de la AES ( $x, y, h$ ).

### 3.1.2. Enfoques de tiempos de llegada

La alternativa de localización de AEs en la que se centra el trabajo de tesis doctoral es la trilateración 3D estándar, debido a que es la que más se ajusta a las necesidades de la aplicación a la que va dirigida y a las condiciones establecidas por la misma. En este caso, la trilateración determina el emplazamiento de la fuente midiendo los tiempos de llegada (TOAs). La Figura 3.5 muestra un esquemático de un tanque, como el de un transformador, con un número  $i$  de sensores acústicos, los cuales se encuentran a una distancia  $D_i$  de la fuente de AE (ubicada en el interior). Dichas distancias son la base geométrica de las diferentes ecuaciones matemáticas. Las ecuaciones no-lineales de observación, en el caso más simple, representan esferas que se intersecan en un punto (el origen de la señal).

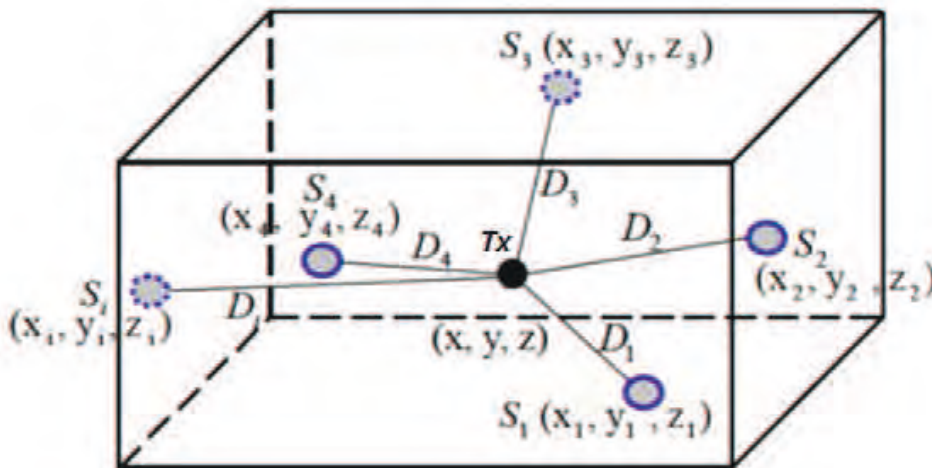


Figura 3.5. Sensores acústicos externos en las paredes del tanque y la fuente de AE en el interior (coordenadas cartesianas).

Dependiendo de si las medidas son mixtas (trigger con señal eléctrica o electromagnética) o todo-acústicas se usarían tres incógnitas (coordenadas espaciales de la fuente  $(x, y, z)$ ) o cuatro (si se desconoce el origen de tiempos), respectivamente. Por tanto, para una localización exacta de la fuente, se necesitan, al menos, cuatro o cinco TOAs (cuatro o cinco sensores).

El nuevo enfoque en el procesado de la señal acústica que trabaja con pseudo-tiempos permite el uso del método de resolución directo GPS (Global Positioning System) en lugar de los algoritmos iterativos utilizados anteriormente [3.4].

### 3.1.2.1. Tiempos absolutos

En medidas mixtas (trigger con señal eléctrica o electromagnética), el instante en el que se produce el evento es conocido. Matemáticamente, esto corresponde a una medida de tiempo absoluto (Figura 3.6).

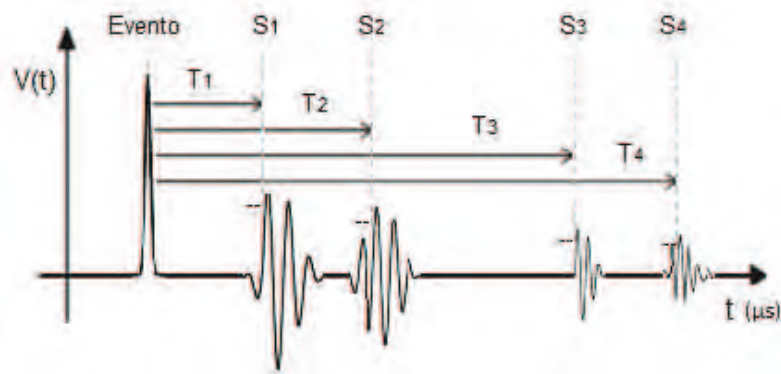


Figura 3.6. Esquemático de tiempos de llegada con referencia de tiempos conocida (trigger eléctrico/electromagnético).

El sistema de ecuaciones (esferas) con las tres incógnitas asociadas a las coordenadas de la fuente  $(x, y, z)$ , los tiempos de llegada  $T_i$ , la velocidad del sonido  $v_s$  y la ubicación de los sensores  $(x_i, y_i, z_i)$  es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= (v_s \cdot T_1)^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= (v_s \cdot T_2)^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= (v_s \cdot T_3)^2 \\
 (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 &= (v_s \cdot T_4)^2
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

Estas ecuaciones describen esferas de radio  $D_i$ :

$$D_i = (v_s \cdot T_i)^2
 \tag{25}$$

Esta aproximación es válida porque el retardo de propagación del trigger eléctrico/electromagnético ( $ns$ ) es despreciable frente a los TOAs típicos de las señales acústicas (en el rango de los  $\mu s$ - $ms$ ).

### 3.1.2.2. Diferencias de tiempos

En medidas todo-acústicas, como las realizadas en este trabajo de investigación, se desconoce el instante exacto en el cual se produce el evento (sin trigger eléctrico/UHF), por esta razón se necesita un sensor más.

En este enfoque el trigger lo dispara el sensor más cercano (asumiendo propagación en línea recta) provocando el registro de la señal en todos los sensores a la vez. En el caso de utilizar cinco sensores (sistema con solución) se obtienen cuatro diferencias de tiempos de llegada (TDOAs), tomando como referencia el sensor que dispara el trigger. La Figura 3.7 muestra las diferencias de tiempos de las señales acústicas con referencia de tiempos desconocida.

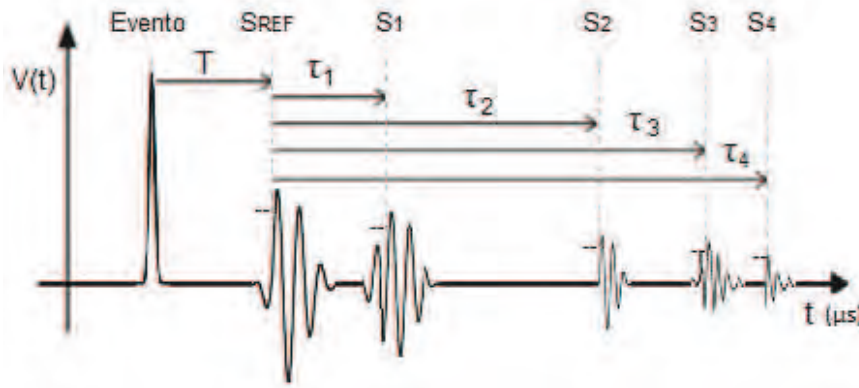


Figura 3.7. Esquemático de diferencias de tiempos con referencia de tiempos desconocida ( $T$ ).

El radio de las esferas se modifica con el origen de tiempos desconocido  $T$  y por las medidas de diferencias de tiempos  $\tau_i$ . El sistema de ecuaciones no-lineales de observación con enfoque de diferencias de tiempos queda del siguiente modo:

$$\begin{aligned}
 (x - x_{REF})^2 + (y - y_{REF})^2 + (z - z_{REF})^2 &= (v_s \cdot T)^2 \\
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= (v_s \cdot (T + \tau_1))^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= (v_s \cdot (T + \tau_2))^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= (v_s \cdot (T + \tau_3))^2 \\
 (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 &= (v_s \cdot (T + \tau_4))^2
 \end{aligned} \tag{26}$$

### 3.1.2.3. Pseudo-tiempos

Una segunda alternativa para plantear el sistema de ecuaciones no-lineales de observación que trabaje con medidas todo-acústicas es el uso de los llamados pseudo-tiempos  $T'_i$  (tiempos de vuelo con una constante de offset adicional). Esta aproximación obtiene como resultado un sistema similar al GPS. En este caso, la variable adicional desconocida es el offset  $\Delta t$ . La Figura 3.8 muestra como los pseudo-tiempos de cinco señales acústicas dependen del offset mencionado.

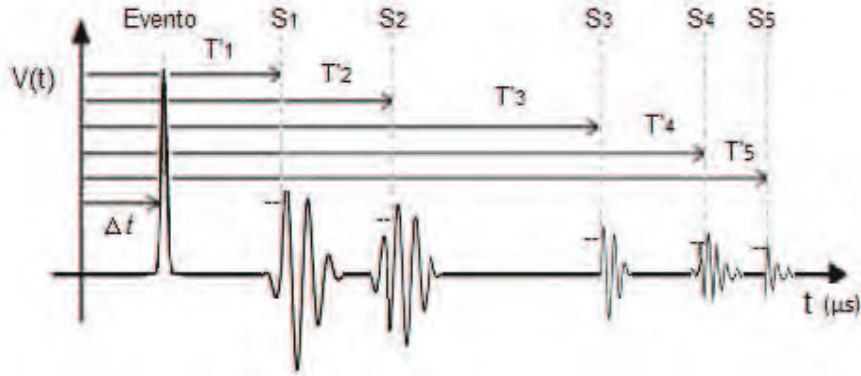


Figura 3.8. Esquemático de pseudo-tiempos con referencia de tiempos desconocida ( $\Delta t$ ).

Medidas todo-acústicas con cinco o más sensores actúan como un problema de posicionamiento satélite-receptor inverso y da lugar a un sistema de ecuaciones matemáticamente idénticas. El modo más habitual de manejo de estos pseudo-tiempos es con un pre-trigger. Por lo que, en este caso, el origen de tiempos depende del nivel de ajuste del pre-trigger.

De nuevo, el radio de las esferas se modifica con la variable adicional  $\Delta t$ . El sistema de ecuaciones que se obtiene es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= (v_s \cdot (T'_1 - \Delta t))^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= (v_s \cdot (T'_2 - \Delta t))^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= (v_s \cdot (T'_3 - \Delta t))^2 \\
 (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 &= (v_s \cdot (T'_4 - \Delta t))^2 \\
 (x - x_5)^2 + (y - y_5)^2 + (z - z_5)^2 &= (v_s \cdot (T'_5 - \Delta t))^2
 \end{aligned} \tag{27}$$

El sistema de ecuaciones se vuelve simétrico debido a que todos los pseudo-tiempos  $T'_i$  contienen el offset  $\Delta t$ . La relación es:

$$T'_i - \Delta t = T_i, i = 1..N \quad (28)$$

$$T'_1 - \Delta t = T \quad (29)$$

Además, las dos variantes del sistema de ecuaciones para medidas todo-acústicas se encuentran interconectadas a través de la ecuación (29).

La notación de pseudo-tiempos permite detectar defectos en los tiempos absolutos en las medidas mixtas. En términos de pseudo-tiempos, este es un caso concreto de compensación con offset  $\Delta t$ .

## 3.2. Técnicas de medida de tiempos de llegada

La medida de tiempos de llegada (TOAs) representa una etapa determinante en el proceso de localización. La precisión de dicho proceso dependerá, entre otras cosas, de la precisión con la cual se midan dichos tiempos. Un error en el cálculo de los TOAs implicaría una desviación importante del resultado de localización con respecto a la posición real de la AES.

A continuación se describen algunas de las técnicas más comúnmente usadas para la determinación de los TOAs.

### 3.2.1. Técnica de umbral o umbral de envolvente

El inicio de la AE o el TOA se obtienen cuando la señal o su envolvente superan un cierto nivel con respecto al ruido o alcanzan su máximo. Esta técnica sólo es viable con AEs cuya amplitud sea mayor que la del ruido. El estándar IEEE Std C57.127 [3.5] emplea esta técnica para detectar AEs de PDs.

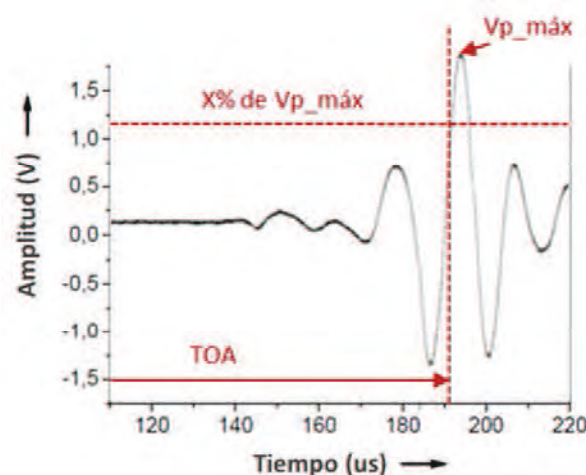


Figura 3.9. Cálculo de TOA por umbral.

En este trabajo de investigación se ha empleado esta técnica para determinar los TOAs, ya que es la que más se ajusta a las necesidades teniendo en cuenta las condiciones establecidas y el instrumental empleado. El TOA se obtiene cuando la señal alcanza su máximo o cuando supera un porcentaje del mismo como se muestra en la Figura 3.9.

### 3.2.2. Criterio de la energía (*Energy Criterion - EC*)

El criterio de la energía [3.6] mide la variación de la energía de una señal cuando se detecta una AE. La curva de energía  $S'_i$  de la señal  $x$  se define como la suma acumulativa de valores de amplitud:

$$S'_i = \sum_{k=0}^i (x_k^2 - i \frac{S_N}{N}) \quad (30)$$

donde  $i$  es la muestra de la señal donde se evalúa  $S'$ ,  $N$  es la longitud de la señal y  $S_N$  es la energía total de la señal.

El inicio de la AE, que se corresponde con el TOA, se obtiene buscando el mínimo global en la ecuación (30). La Figura 3.10 muestra un ejemplo del proceso.

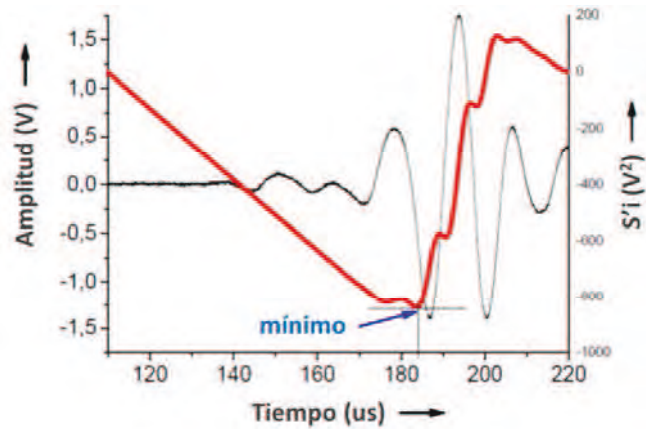


Figura 3.10. Señal acústica con su curva de energía.

### 3.2.3. Criterio de información de Akaike (*Akaike Information Criterion – AIC*)

El AIC es una técnica de selección de tiempo autoregresiva (Auto-Regressive – AR) que asume que las AEs pueden ser divididas en segmentos localmente estacionarios modelados con procesos autoregresivos [3.6].

El inicio estimado de la AE, y por tanto el TOA, coincide con el mínimo global obtenido por AIC.

### 3.2.4. Técnica de correlación cruzada (*Cross-Correlation - CC*) con patrones

La correlación cruzada (o a veces denominada covarianza cruzada) es una medida de la similitud entre dos señales.

En este caso, el TOA coincide con el instante asociado al máximo de la correlación cruzada entre el patrón de AE buscada y la señal [3.7].



### 3.3. Estrategias de resolución de ecuaciones de localización

Existen diversos métodos y estrategias que abordan el problema de la resolución del sistema de ecuaciones cuadráticas de trilateración. En este apartado se describen algunas de esas estrategias adaptadas a la aplicación de localización de AEs:

#### 3.3.1. Métodos GPS

Los métodos GPS (Global Positioning System) [3.6] emplean un enfoque similar al de pseudo-tiempos (3.1.1.3), esto permite aplicar algoritmos de resolución directa al sistema de ecuaciones. Los algoritmos directos varían si el sistema es determinado (una solución) o sobredeterminado (múltiples soluciones). El problema de estos métodos es que no siempre resulta fácil encontrar la exacta.

#### 3.3.2. Método basado en tablas de búsqueda (*LookUp Tables - LUTs*)

Este método basa la localización en una búsqueda en LUTs (LookUp Tables) [3.8]. Construyendo tablas (LUTs 3D) que emulan el espacio de estudio (ej. tanque de un transformador) como muestra la Figura 3.11.

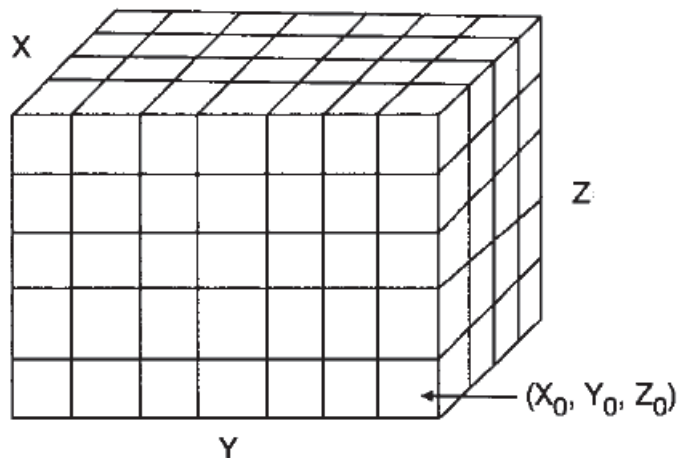


Figura 3.11. Modelo de espacio de estudio (LUT 3D).

Tomando como referencia el sistema de ecuaciones (26), cada posición de la tabla almacena  $f_k$  y  $T$ :

$$fk = (Lk_1, \dots, Lk_N)$$

$$T = \frac{\sqrt{(x - x_{REF})^2 + (y - y_{REF})^2 + (z - z_{REF})^2}}{v_s} \quad (31)$$

donde  $T$  se despeja de la primera ecuación y  $Lk_i$  es:

$$Lk_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2, \quad i = 1..N \quad (32)$$

Una vez construidas las tablas, se inicia la medida de tiempos ( $\tau_i$ ). Para cada conjunto de  $\tau_i$  medidos se calcula  $f^o k$  con cada posición de la tabla:

$$f^o k = (L^o k_1, \dots, L^o k_N) \quad (33)$$

donde  $L^o k_i$  se construye con cada  $T$  de la tabla:

$$L^o k_i = (v_s(T + \tau_i))^2, \quad i = 1..N \quad (34)$$

De este modo, la solución  $(x, y, z)$  se obtiene encontrando la distancia mínima entre  $f^o k$  y  $fk$ :

$$(x, y, z) / \min d(f^o k, fk) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (L^o k_i - Lk_i)^2} \quad (35)$$

Este método basado en búsqueda en LUTs plantea el inconveniente de presentar un coste computacional elevado. En este trabajo se propone un algoritmo de búsqueda en LUTs que reduce el cómputo del método descrito en este apartado.

### 3.3.3. Método de Newton-Raphson

En el método de Newton-Raphson [3.9] se resuelve el sistema (26) aplicando la siguiente ecuación:

$$X_{j+1} = X_j - \frac{f(X_j)}{f'(X_j)} \quad (36)$$

La ecuación (36) puede ser expresada de la siguiente forma:

$$f'(X_j)X_{j+1} = f'(X_j)X_j - f(X_j) \quad (37)$$

El lado izquierdo de la ecuación (37) son variables multiplicadas por coeficientes, y el lado derecho son sólo constantes. El método establece que la solución del sistema es la condición inicial de un nuevo sistema de ecuaciones. Si las soluciones convergen, se podrá ver una menor diferencia entre los nuevos valores y los antiguos.

Para poder aplicar el método es necesario reescribir el conjunto de ecuaciones (26) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - (v_s \cdot (T + \tau_0))^2 &= 0 \\
(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 - (v_s \cdot (T + \tau_1))^2 &= 0 \\
(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 - (v_s \cdot (T + \tau_2))^2 &= 0 \\
(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 - (v_s \cdot (T + \tau_3))^2 &= 0 \\
(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 - (v_s \cdot (T + \tau_4))^2 &= 0
\end{aligned} \tag{38}$$

En este caso el sensor de referencia es  $i=0$ , por lo que  $\tau_0=0$ .

Si se adapta el sistema (38) a la forma matricial de la ecuación (37) se obtiene:

$$\begin{aligned}
&2(x_j - x_i)x_{j+1} + 2(y_j - y_i)y_{j+1} + 2(z_j - z_i)z_{j+1} - 2v_s^2(T_j + z_i)T_{j+1} \\
&= 2(x_j - x_i)x_j + 2(y_j - y_i)y_j + 2(z_j - z_i)z_j - 2v_s^2(T_j + z_i)T_j - \\
&-((x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2 - v_s^2(T_j + z_i)^2) , \quad i=0..N
\end{aligned} \tag{39}$$

donde  $x_j, y_j, z_j$  y  $T_j$  son los valores iniciales o antiguos,  $(x_i, y_i, z_i)$  con las coordenadas del  $i$ -ésimo sensor y  $x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1}$  y  $T_{j+1}$  los valores nuevos. La solución es iterativa y converge hacia las coordenadas de la AES.

Este método presenta el inconveniente de tener que establecer una serie de valores iniciales adecuados, y no siempre resulta sencillo encontrarlos.

### 3.3.4. Métodos de resolución matricial

En este punto se describen una serie de métodos que resuelven el sistema de ecuaciones (26). En los siguientes métodos, excepto el PSO [3.10-3.12], el sistema de ecuaciones debe adaptarse previamente a la estructura  $A \cdot X = B$ , para ello se resta la primera ecuación (sensor de referencia) a todas las demás:

$$\begin{aligned}
& 2(x_k - x_{ref})x + 2(y_k - y_{ref})y + 2(z_k - z_{ref})z + 2v_s^2 \tau_k T = \\
& = (x_k^2 - x_{ref}^2) + (y_k^2 - y_{ref}^2) + (z_k^2 - z_{ref}^2) - v_s^2 \tau_k^2, \quad k=1..N
\end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
A &= \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_{ref}) & 2(y_1 - y_{ref}) & 2(z_1 - z_{ref}) & 2v_s^2 \tau_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2(x_N - x_{ref}) & 2(y_N - y_{ref}) & 2(z_N - z_{ref}) & 2v_s^2 \tau_N \end{bmatrix} & X &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ T \end{bmatrix} \\
B &= \begin{bmatrix} (x_1^2 - x_{ref}^2) + (y_1^2 - y_{ref}^2) + (z_1^2 - z_{ref}^2) - v_s^2 \tau_1^2 \\ \dots \\ (x_N^2 - x_{ref}^2) + (y_N^2 - y_{ref}^2) + (z_N^2 - z_{ref}^2) - v_s^2 \tau_N^2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

**Métodos directos:** Estos son algunos métodos clásicos de resolución matricial de sistemas de ecuaciones.

Método de Mínimos Cuadrados (Least Squares - LS): Resuelve el sistema aplicando

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B.$$

Método de Mínimos Normalizados (Least Norm - LN): Aplica  $X = A^T (A A^T)^{-1} B$ .

Método de Cramer: Este método sólo puede ser usado si  $\det(A) \neq 0$ , y consiste en:

$$\begin{aligned}
A &= [A_x \ A_y \ A_z \ A_T] \\
x &= \frac{|B \ A_y \ A_z \ A_T|}{|A|}, \quad y = \frac{|A_x \ B \ A_z \ A_T|}{|A|}, \\
z &= \frac{|A_x \ A_y \ B \ A_T|}{|A|}, \quad T = \frac{|A_x \ A_y \ A_z \ B|}{|A|}
\end{aligned} \tag{41}$$

**Método indirecto:**

Método Indirecto No-Iterativo (Indirect Non-Iterative - INI): Este método resuelve el sistema de ecuaciones (40) reduciéndolo a una ecuación de segundo grado [3.13].

### 3.3.5. Método de optimización por nube de partículas (*Particle Swarm Optimization – PSO*)

El último método descrito es el llamado método de Optimización por Nube de Partículas (Particle Swarm Optimization - PSO), que basa su algoritmo iterativo de resolución en el comportamiento de un enjambre de abejas en la naturaleza. PSO trabaja con una población (llamada nube o enjambre) de soluciones candidatas (llamadas partículas). Dichas partículas se desplazan a lo largo del espacio de búsqueda conforme a ciertas reglas matemáticas. El movimiento de cada partícula depende de su mejor posición obtenida, así como de la mejor posición global hallada en todo el espacio de búsqueda. A medida que se descubren nuevas y mejores posiciones, éstas pasan a orientar los movimientos de las partículas. El proceso se repite con el objetivo, no garantizado, de hallar en algún momento una solución lo suficientemente satisfactoria.

Existen varias versiones de este método, una de las más completas incluye un factor de inercia ( $w$ ) y un coeficiente de constricción ( $\gamma$ ) [3.10-3.12], y se explica a continuación:

El sistema de ecuaciones (26) se reescribe para minimizar la llamada función fitness  $f(p)$ :

$$f(p) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left[ (px_j - x_i)^2 + (py_j - y_i)^2 + (pz_j - z_i)^2 - v_s^2 (pT_j + \tau_i)^2 \right] \quad (42)$$

donde  $n$  es el número de partículas,  $m$  es el número de sensores,  $\tau_i$  es el TDOA del  $i$ -ésimo sensor (en este método el sensor de referencia es  $i=1$ ,  $\tau_1=0$ ),  $v_s$  es la velocidad del sonido en el medio,  $[px_j, py_j, pz_j, pT_j]^T = p_j$  es la ‘posición’ (4D) de la  $j$ -ésima partícula y  $[x_i, y_i, z_i]^T = s_i$  es la posición del  $i$ -ésimo sensor.

El PSO con factor de inercia ( $w$ ) y factor de constricción ( $\gamma$ ) es:

$$\begin{aligned} v_j(t+1) &= w_k \cdot v_j(t) + c_1 R_1 [p_j^{best}(t) - p_j(t)] + c_2 R_2 [g^{best}(t) - p_j(t)] \\ p_j(t+1) &= p_j(t) + \gamma \cdot v_j(t+1) \end{aligned} \quad (43)$$

donde  $v_j(t) = [vx_j(t), vy_j(t), vz_j(t), vT_j(t)]^T$  es la velocidad de la  $j$ -ésima partícula con tiempo  $t$ ,  $p_j(t) = [px_j(t), py_j(t), pz_j(t), pT_j(t)]^T$  es la posición de la  $j$ -ésima partícula con tiempo  $t$ ,  $w_k$  es el factor de inercia,  $\gamma$  es el coeficiente de constricción,  $c_1$  y  $c_2$  son factores entre 1 y 4,  $R_1$  y  $R_2$  son matrices diagonales con elementos entre 0 y 1,  $p_j^{best}(t)$  es el mejor resultado de la  $j$ -ésima partícula y  $g^{best}(t)$  es el mejor resultado de todo el grupo de partículas.

El factor de inercia ( $w_k$ ) se calcula dinámicamente:

$$w_k = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{N} k \quad (44)$$

donde  $k$  es la iteración actual,  $N$  es el número de iteraciones y  $[w_{min}, w_{max}]$  es el intervalo de variación del factor de inercia.

El valor del coeficiente de constricción ( $\gamma$ ) depende de los factores  $c_1$  y  $c_2$ :

$$\gamma = \frac{2}{2 - \gamma - \sqrt{\gamma^2 - 4\gamma}}, \gamma = c_1 + c_2, \gamma > 4 \quad (45)$$

El método PSO obtiene muy buenos resultados, tanto en precisión como en comportamiento en ambientes ruidosos. En este trabajo de investigación se implementa y se pone a prueba la respuesta de este algoritmo.

### 3.4. Conclusiones

En este trabajo de investigación se incluye un software de localización que emplea el método de trilateración y sus respectivas ecuaciones. Se ha elegido el enfoque de diferencias de tiempos ya que las medidas realizadas son propias de un sistema completamente acústico. El método escogido para determinar los TOAs ha sido la técnica de umbral. Para resolver el sistema el sistema de ecuaciones de localización se han utilizado varias estrategias descritas en este capítulo y cuya implementación y caracterización se presentan en los siguientes apartados.

# Capítulo 4

## Arquitecturas y procesamiento para la detección y localización de emisiones acústicas

En este capítulo se presentan las diferentes arquitecturas propuestas que cumplen con los siguientes objetivos:

- Realizar una detección acústica multicanal (hasta 8 canales) que integre diferentes tipos de sensores (PZT, OF, etc.).
- Incluir técnicas de reducción de ruido aplicadas a señales acústicas para minimizar el umbral de detección. Previamente las técnicas de *denoising* se centran fundamentalmente en medidas eléctricas.
- Incluir un módulo de localización de la AES que integre diferentes estrategias de resolución del sistema de ecuaciones de trilateración.

Con todo ello se dispone de un sistema de instrumentación multicanal completo y funcional para la detección y localización de AEs de ultrasonidos.

A este fin, la estructura general del hardware y software de procesamiento implementados sigue el esquema de la Figura 4.1.



Figura 4.1. Estructura básica de hardware y software de detección y localización de AEs.

El esquemático de la figura 4.1 incluye sensores acústicos, hardware de acondicionamiento y adquisición de señal y software de adquisición, detección de AEs, reducción de ruido (*denoising*) y localización de AES. A continuación se exponen y explican cada una de estas etapas y las diferentes propuestas de diseño.

## 4.1. Sensores de ultrasonidos y hardware de acondicionamiento y adquisición

En este apartado se describen cada uno de los elementos de los que consta el hardware de medida de AEs.

### 4.1.1. Instrumentación con sensores PZT

El sistema completo de sensores PZT es el descrito en la Figura 4.2. Los bloques más importantes, de los que se encuentra constituido, se describirán a continuación.

El sensor utilizado es un transductor piezoeléctrico colocado y fijado a la pared exterior del tanque de ensayos acústicos o del transformador. Con el objetivo de facilitar la transmisión de la energía acústica desde la pared de la cuba hacia el sensor, se usa un material acoplante entre ambos. Comúnmente se utilizan gel de glicerina o grasa de silicona.

Dicho sensor es un modelo R15I-AST (Physical Acoustic Corporation) (Anexo I), con las siguientes características: Rango de operación  $80\text{--}200\text{ kHz}$ , resonante a  $150\text{ kHz}$ , preamplificador de bajo ruido integrado, salida filtrada y adaptada a  $50\ \Omega$  de impedancia. La sensibilidad de estos sensores es de aproximadamente  $1\text{ V/Pa}$  tras pasar por la etapa de preamplificación de  $40\text{ dB}$ , que viene integrada en el mismo sensor.



Debido a que el sensor R15I posee una electrónica integrada y a que no tiene puertos independientes para la alimentación y para la salida es necesario acondicionarlo mediante un circuito de Bias-T, el cual suministra alimentación tanto al preamplificador como al filtro (integrados), proporcionando también una salida desacoplada de la etapa de alimentación.

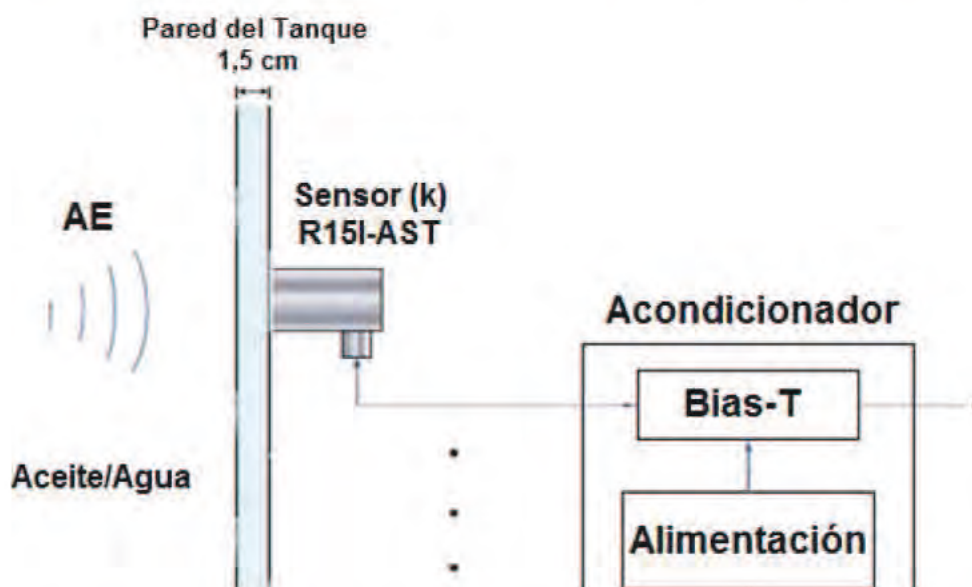


Figura 4.2. Sistema de instrumentación basado en sensores PZT (R15I-AST).

#### 4.1.2. Instrumentación con sensores de fibra óptica

El esquema de instrumentación para el sensor de OF ha sido diseñado íntegramente por el grupo de investigación de optoelectrónica y tecnología láser de la Universidad Carlos III de Madrid (Figura 4.3). Se encuentra constituido por una sonda de fibra monomodo a  $633\text{ nm}$  en forma de bobina que es sensible a AEs de  $150\text{ kHz}$  (TABLA I). El sistema optoelectrónico de acondicionamiento está iluminado por una fuente de luz coherente (Láser de He-Ne).

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE OF

Nº de capas del sensor	Longitud de la fibra (m)	Sensibilidad (@150 kHz)	
		(mrad/Pa)	Para un rango de salida de 20V (mV/Pa)
2	6.8	0.46	4.6
5	17	1.1	11.1

El sistema de acondicionamiento se basa en un interferómetro, un actuador electro-mecánico, un amplificador de transimpedancia con dos detectores en configuración diferencial y

una etapa de filtrado paso-banda. Este dispositivo proporciona una salida de voltaje proporcional a la fase óptica, que es a su vez proporcional a la presión acústica [4.1].

El interferómetro detecta los cambios de fase óptica ( $\Delta\phi$ ) en la sonda OF provocados por los cambios de presión ( $\Delta P_r$ ) que en ella produce la onda acústica:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_0}{P_0} \Delta P_r \quad (46)$$

donde  $P_0$  es un factor que depende de los coeficientes elasto-ópticos, el módulo de Young y el ratio de Poisson.  $\phi_0$  se obtiene:

$$\phi_0 = \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda} \quad (47)$$

donde  $L$  es la longitud de la fibra expuesta a la AE,  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo de la fibra y  $\lambda$  es la longitud de onda óptica.

La señal óptica de salida es registrada por dos detectores configurados en modo diferencial (mayor sensibilidad), para luego ser amplificada y convertida en una señal de tensión ( $V_s$ ):

$$V_s = 2I_0 \Delta\phi R \eta G_T G_F \quad (48)$$

donde  $I_0$  la potencia óptica media en cada fotodetector,  $R$  es la responsividad de los fotodetectores,  $\eta$  es un factor entre 0 y 1 que depende del contraste de la interferencia ( en este caso 0.6),  $G_T$  y  $G_F$  son las ganancias de transimpedancia y del filtro paso-banda respectivamente.

Si se sustituye la ecuación (46) en la ecuación (48), el resultado es una tensión de salida proporcional al cambio de presión acústica tal como se refleja a continuación:

$$V_s = 2I_0 \frac{\phi_0}{P_0} \Delta P_r R \eta G_T G_F \quad (49)$$

Con el fin de reducir las perturbaciones de baja frecuencia (cambios de temperatura, vibraciones, etc.) y para mantener el interferómetro en una región lineal con máxima sensibilidad (desfase óptico =  $\pi/2$  rad) se ha implementado un sistema de estabilización. Utiliza

un modulador de fase óptica piezoeléctrico actuando sobre un brazo del interferómetro para compensar las perturbaciones detectadas y realimentadas a través de un circuito basado en un integrador electrónico de la señal de error (detección homodina directa). La función de la etapa de filtrado paso-banda es obtener las mismas características de respuesta en frecuencia que los sensores PZT.

El manual de procedimiento para la realización de medidas con el interferómetro de fibra óptica se encuentra en el Anexo I.

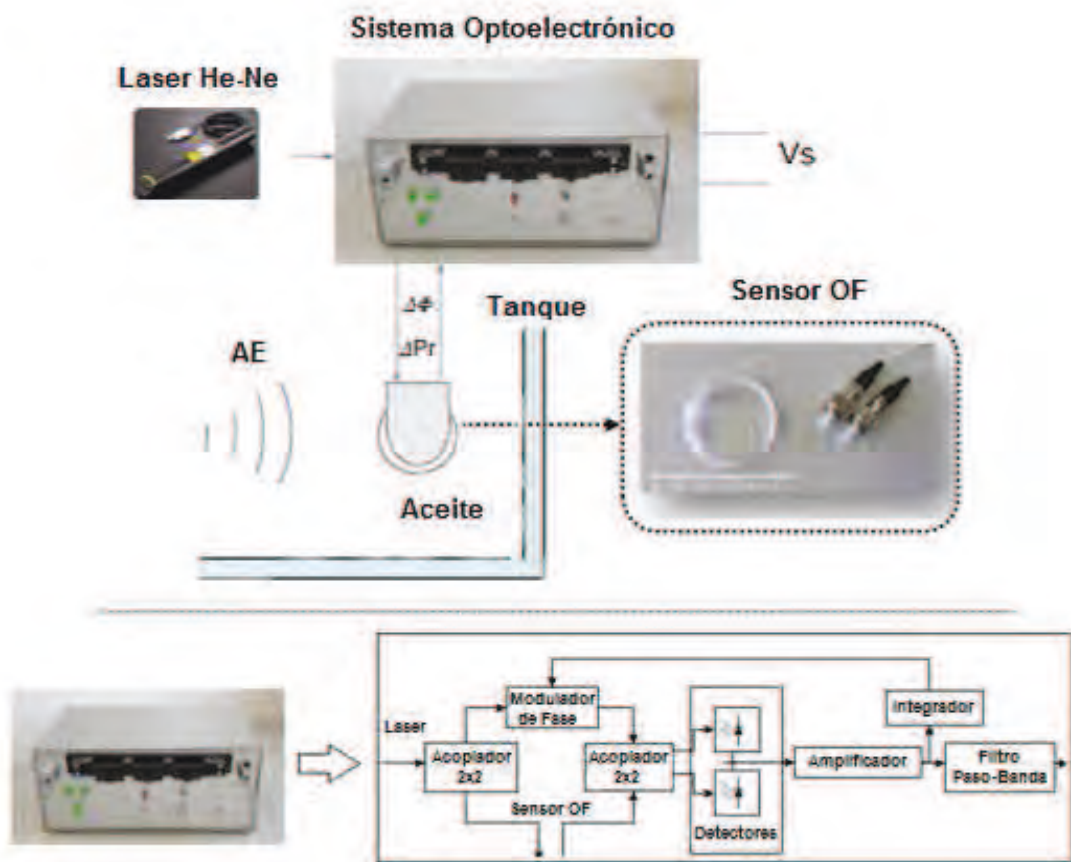


Figura 4.3. Diagrama de bloques del sistema de instrumentación basado en sensores de OF.

### 4.1.3. Hardware de adquisición de señal

Se ha usado un PXI industrial con el objetivo de integrar en el mismo sistema diferentes tipos de sensores (PZT, OF, etc.) y procesamiento de señal. El sistema PXI (National Instruments/ Anexo I) es una plataforma abierta basada en PC para pruebas, medidas y control. Incluye un módulo de adquisición de datos (NI PXI-5105 / Anexo I) con 8 canales de adquisición simultánea de 12 bits de resolución, 60 MS/s de velocidad de muestreo en tiempo real, 60 MHz de ancho de banda y 128 MB de memoria integrada (Figura 4.4).

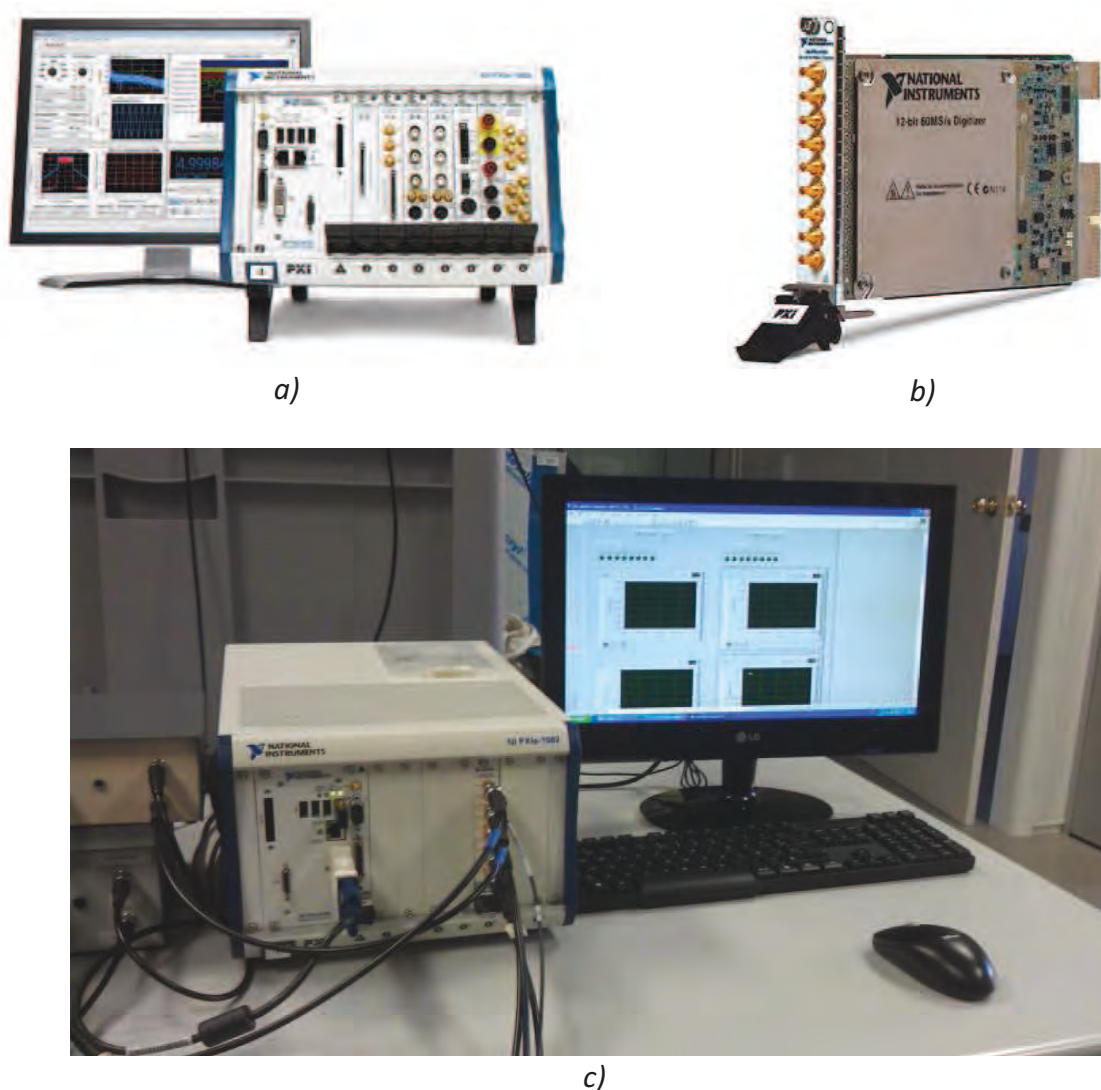


Figura 4.4. Plataforma PXI a), módulo NI PXI-5105 b) y sistema completo de adquisición multicanal del laboratorio c).

## 4.2. Software de adquisición, detección de emisiones acústicas y reducción de ruido (*denoising*)

Las diferentes etapas de las que consta el sistema software de detección y localización de AEs se describen a continuación:

### 4.2.1. Etapa de adquisición y detección de emisiones acústicas

Para configurar la etapa de adquisición y detección de señales acústicas se ha empleado un instrumento virtual estándar (“NI-SCOPE Express”) (Figura 4.5).

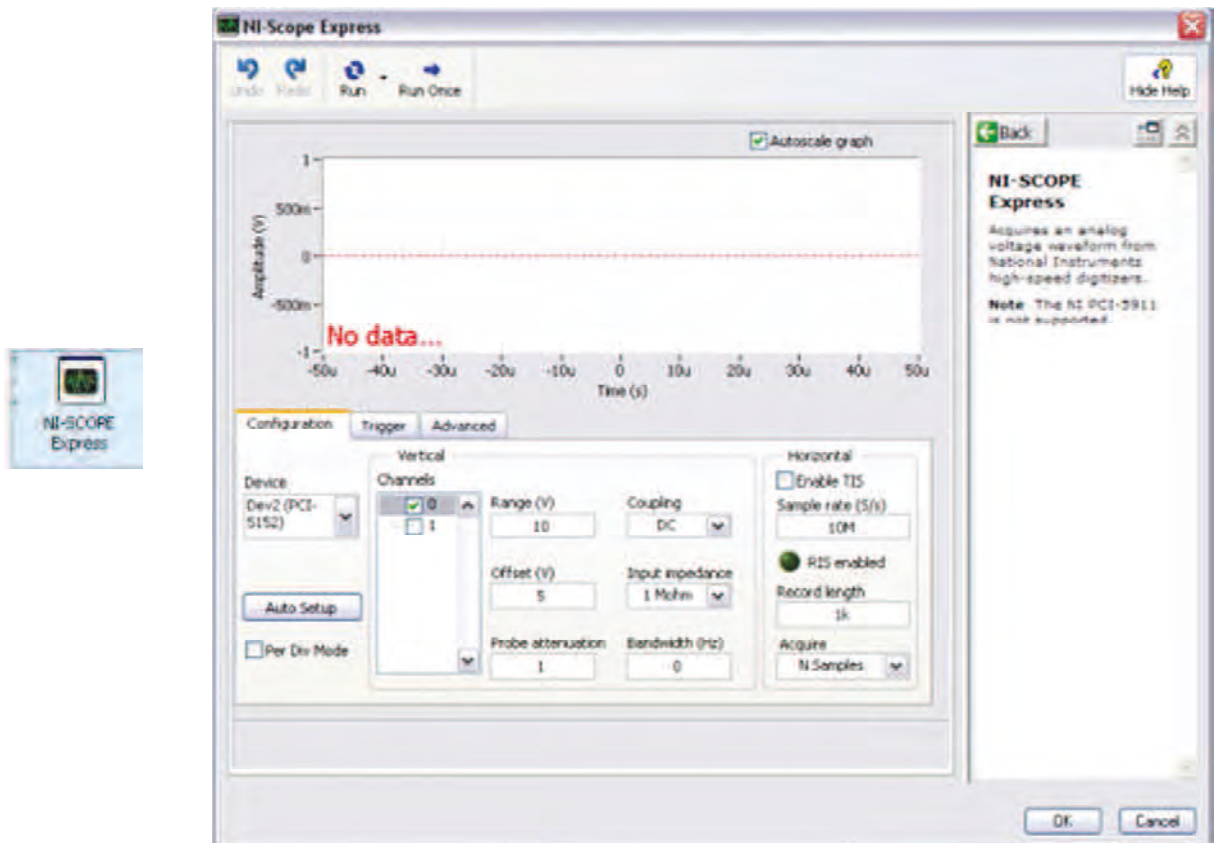
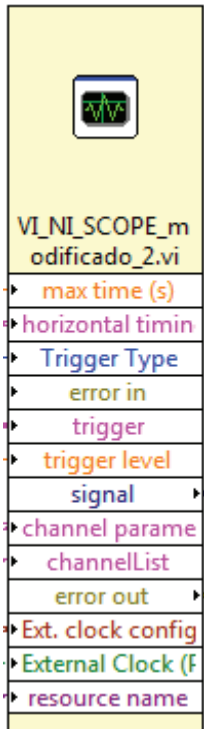
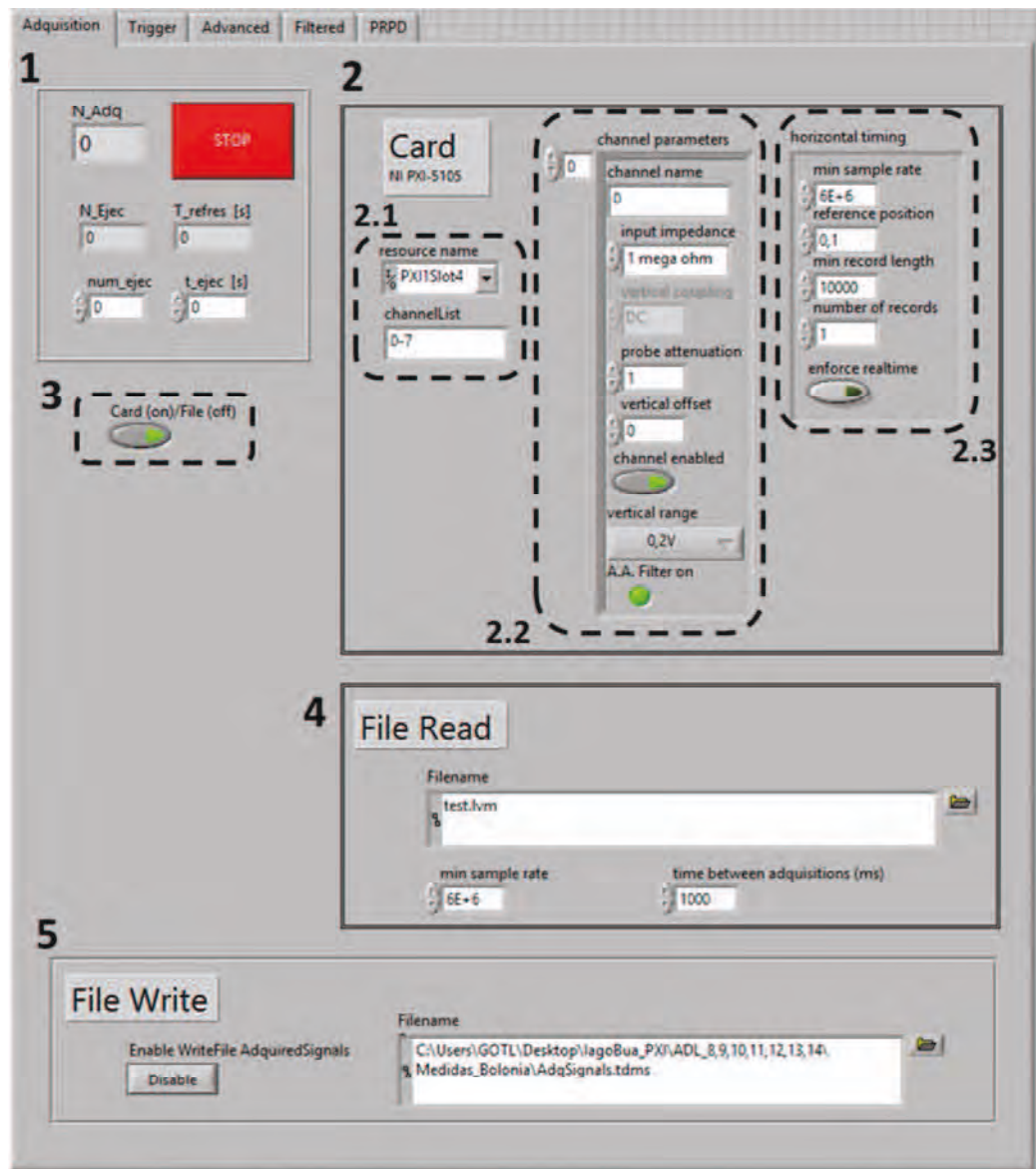


Figura 4.5. NI-SCOPE Express y panel de configuración personal del NI-SCOPE Express.

Los VIs Express presentan el inconveniente de que no pueden ser configurados desde el panel frontal general de LabVIEW, por esta razón se ha modificado dicho VI con el objetivo de una más fácil y rápida configuración de los datos deseados. El resultado de la modificación se muestra en la Figura 4.6.



a)



b)

Figura 4.6. NI-SCOPE Express modificado a) y panel de configuración general de la adquisición (dentro del panel frontal general) b).

El panel de configuración anterior está constituido por varios bloques. El bloque (1) permite configurar y registrar parámetros de ejecución del programa (número de ejecuciones, número de adquisiciones o detecciones de señal, parada manual, etc.). El bloque (3) es un interruptor que permite seleccionar si la entrada de señal se producirá a través de la tarjeta de adquisición (2) o a través de un fichero (4). El bloque (2) configura la tarjeta de adquisición, eligiendo tanto el slot en el que se encuentra la tarjeta de adquisición (NI PXI-5105) como los canales a utilizar (2.1), configurando los parámetros de cada canal (nombre, impedancia entrada ( $1\text{ M}\Omega$  o  $50\Omega$ ), acoplo, rango, etc.) (2.2) y seleccionando la velocidad de adquisición, profundidad de memoria, etc. (2.3). Y por último, el bloque (5) permite almacenar las señales adquiridas.

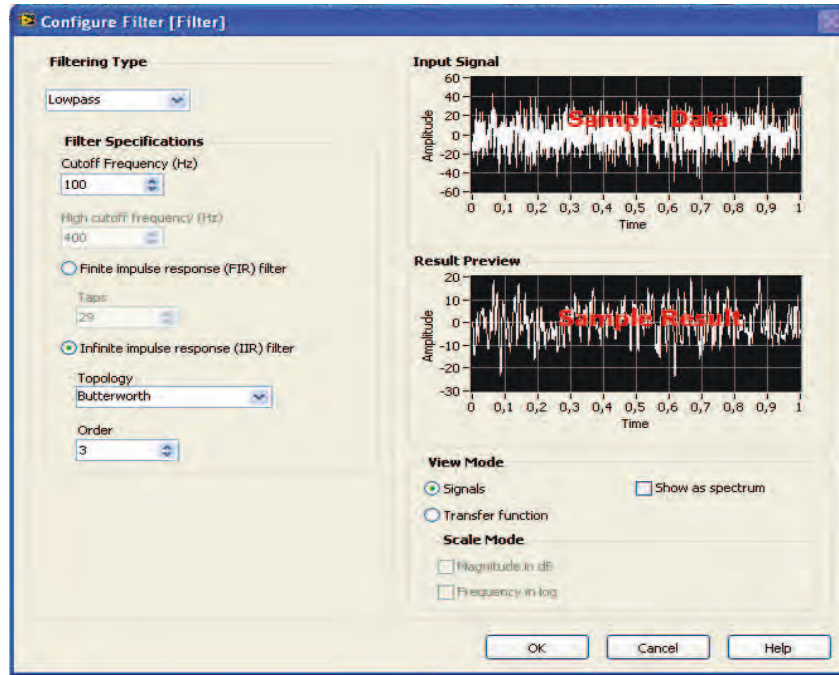
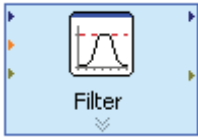
### 4.2.2. Etapa de reducción de ruido (*denoising*)

En el trabajo de tesis de máster [4.2] se usaron y probaron diferentes técnicas eléctricas de denoising de PDs con medidas acústicas; las más útiles resultaron ser las técnicas wavelet y el filtrado digital. El uso de filtrado wavelet (WT) [4.3] resulta adecuado para eliminar el ruido de fondo blanco y gaussiano, permitiendo mejorar la resolución en la detección de señales transitorias debidas a ráfagas de ultrasonidos, como las generadas por descargas parciales. Sin embargo, utilizando únicamente esta técnica de reducción de ruido, no es posible eliminar ruido monocromático e interferente, si bien esto se resuelve mediante un post-procesamiento con filtrado digital paso-banda (Band-Pass Filter - BPF) en el rango de frecuencias de interés. Este filtro paso-banda cumple con el estándar IEEE [4.4] que propone un filtro con una banda de paso en  $100-300\text{ kHz}$  para eliminar vibraciones causadas por bombas y ventiladores ( $<30\text{ kHz}$ ), el ruido Barkhausen ( $\approx 50\text{ kHz}$ ), etc. Como consecuencia, el sistema más adecuado para la detección de descargas parciales es una combinación en secuencia de ambos métodos (WT+BPF) [4.5].

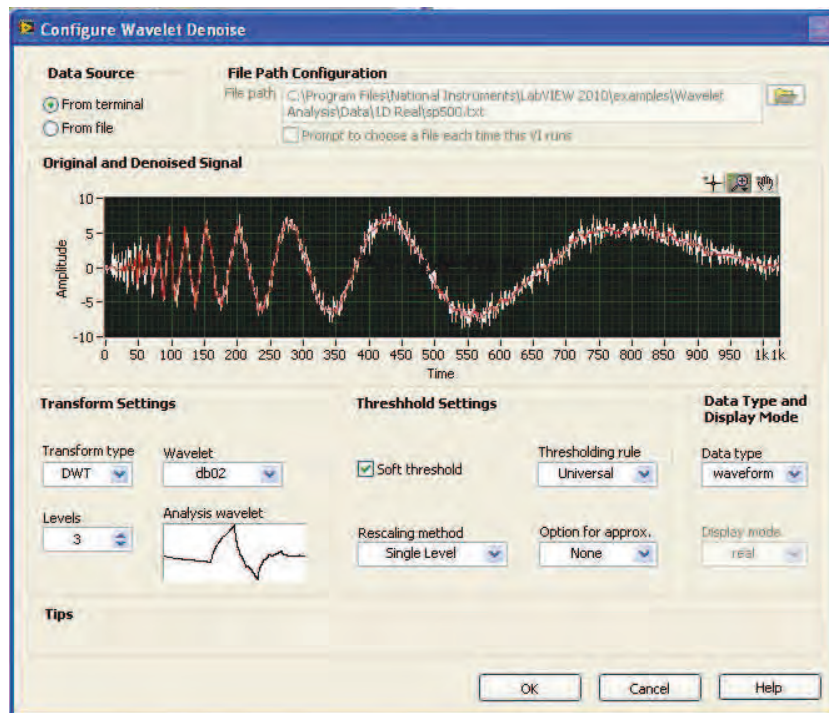
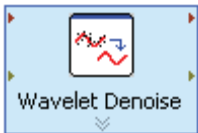
Sin embargo, un análisis más profundo, derivado de la tesis de máster, demostró que el filtrado wavelet era suficiente para eliminar el ruido interferente cuando el umbral aplicado en el filtrado se calcula para cada nivel de descomposición por separado en lugar del mismo para todos los niveles.

En este trabajo de investigación se incluye una secuencia de ambos métodos (WT + BPF). Las técnicas se pueden usar solas o en conjunto, pero en el caso de una utilización conjunta, esta debe seguir ese orden.

La implementación y configuración del software se describe a continuación. En la etapa de denoising se configura la secuencia de reducción de ruido y se calculan los TOAs empleados en la etapa posterior de localización. En este caso, también se emplean VIs Express modificados para facilitar la configuración del sistema. Los VIs usados son “Filter” que permite implementar filtros paso-alto, paso-bajo, paso-banda y banda eliminada, y “Wavelet Denoise” para configurar el filtrado wavelet (Figura 4.7 y 4.8).



a)



b)

Figura 4.7. Filter y panel de configuración personal de Filter a) y Wavelet Denoise y panel de configuración personal de Wavelet Denoise b).



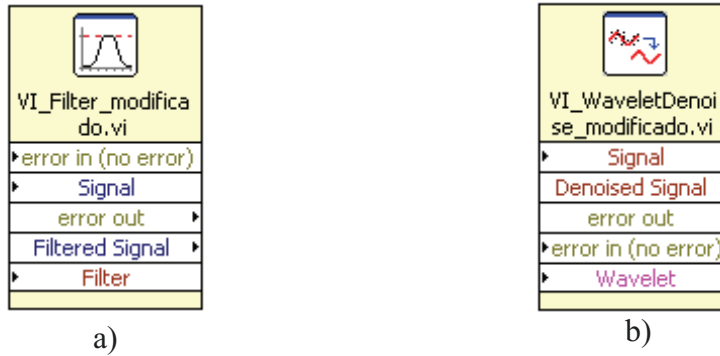


Figura 4.8. Filter modificado a) y Wavelet Denoise modificado b).

Una vez seleccionada la secuencia de reducción de ruido más adecuada, el panel de configuración que permite introducir los parámetros deseados para configurar el filtrado es el mostrado en la Figura 4.9 (filtrado wavelet (1): Wavelet madre, niveles de descomposición, tipo de umbral, método de cálculo de umbral, etc. y filtrado paso-banda (2): frecuencias de corte, tipo de filtro, orden del filtro, etc.).

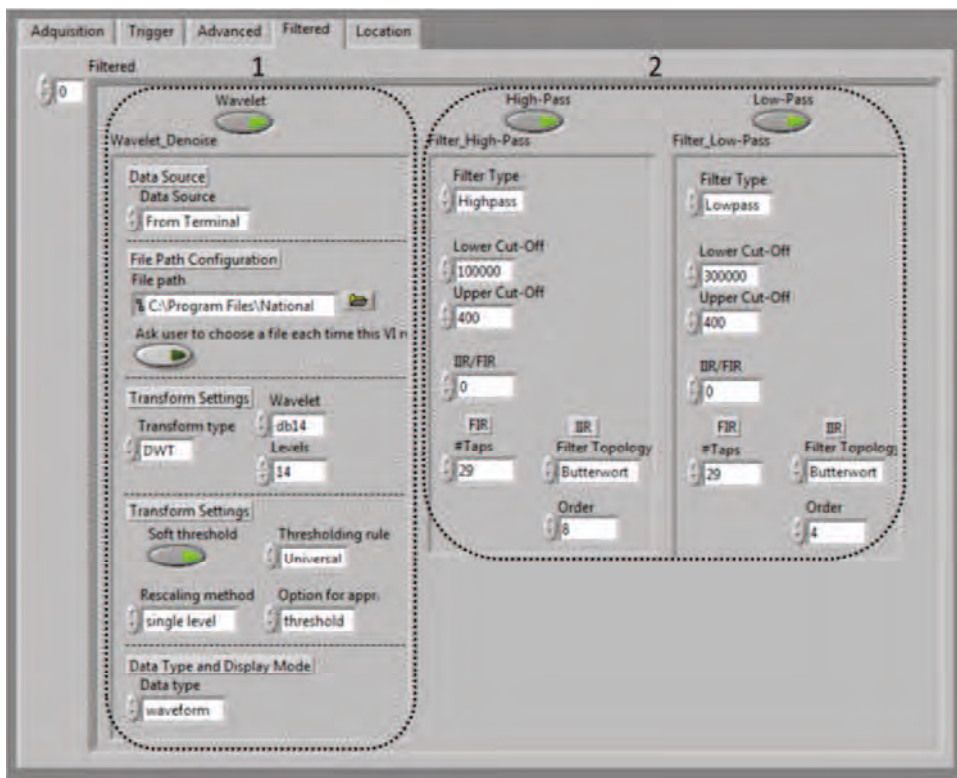


Figura 4.9. Panel de configuración de filtrado (dentro del panel frontal general).

La sección de programa que permite obtener los TOAs es el mostrado en la Figura 4.10. Para ello, en primer lugar se obtiene la amplitud del pico máximo (1), después se localiza el primer punto (3) que supera el umbral establecido  $X\%$  (configurable: 100%, 80%, etc.) respecto al pico máximo (2). Para obtener el TOA se divide el número de muestra en la que se encuentra dicho punto entre la velocidad de adquisición (4).

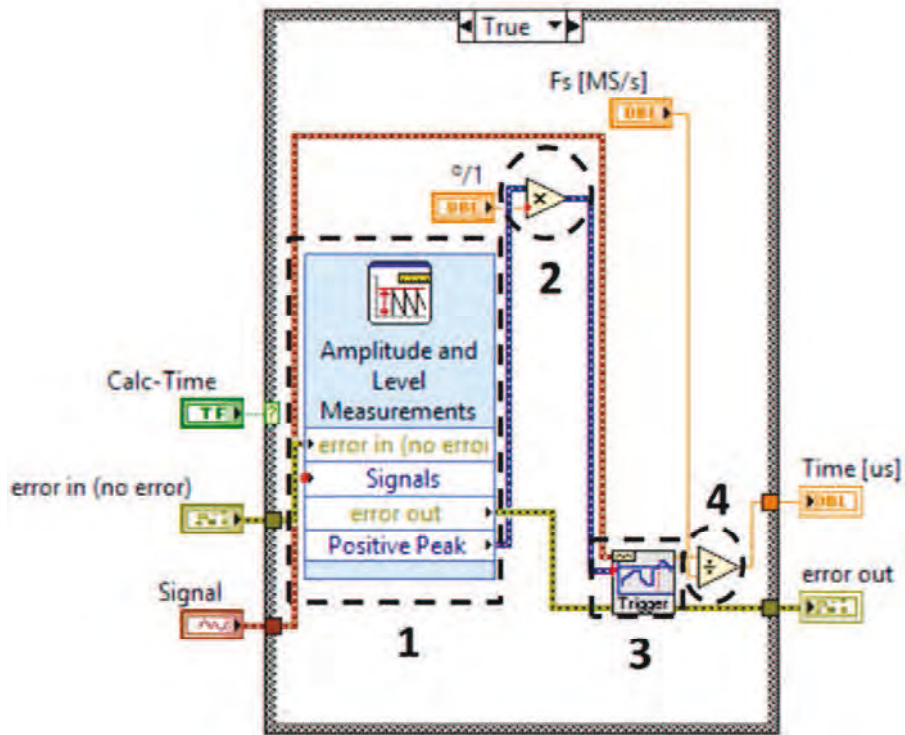


Figura 4.10. Diagrama de bloques para el cálculo de los TOAs (VI\_TOA (X%).)

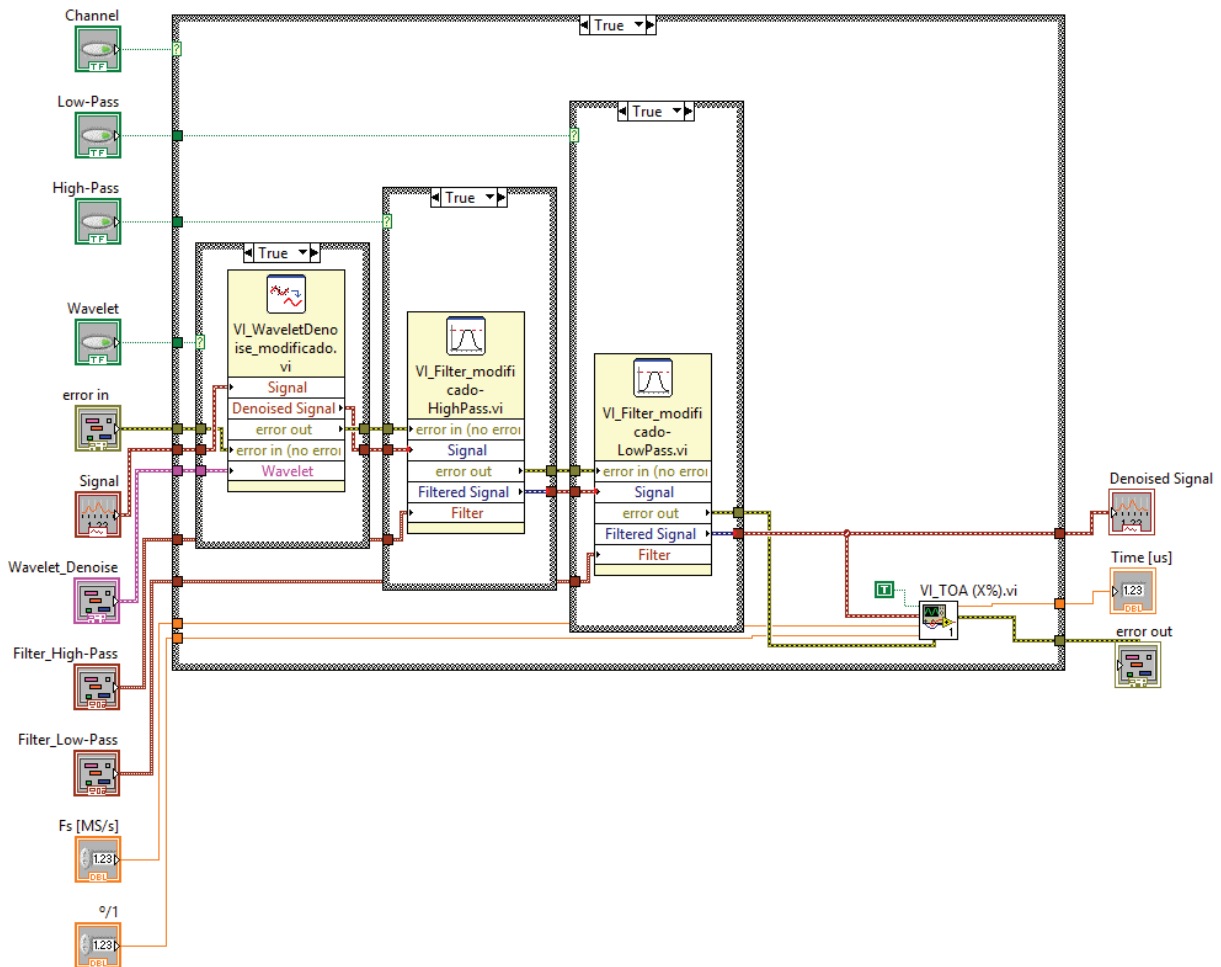


Figura 4.11. Diagrama de bloques con secuencia de reducción de ruido y cálculo de los TOAs.

De esta forma, el diagrama de bloques completo con secuencia de reducción de ruido y cálculo de los TOAs es el que muestra la Figura 4.11.

Otra característica interesante del panel frontal diseñado es la posibilidad de poder seleccionar los canales que se desean visualizar (hasta 8 canales simultáneos), tanto filtrados como sin filtrar (Figura 4.12), así como los TOAs calculados.

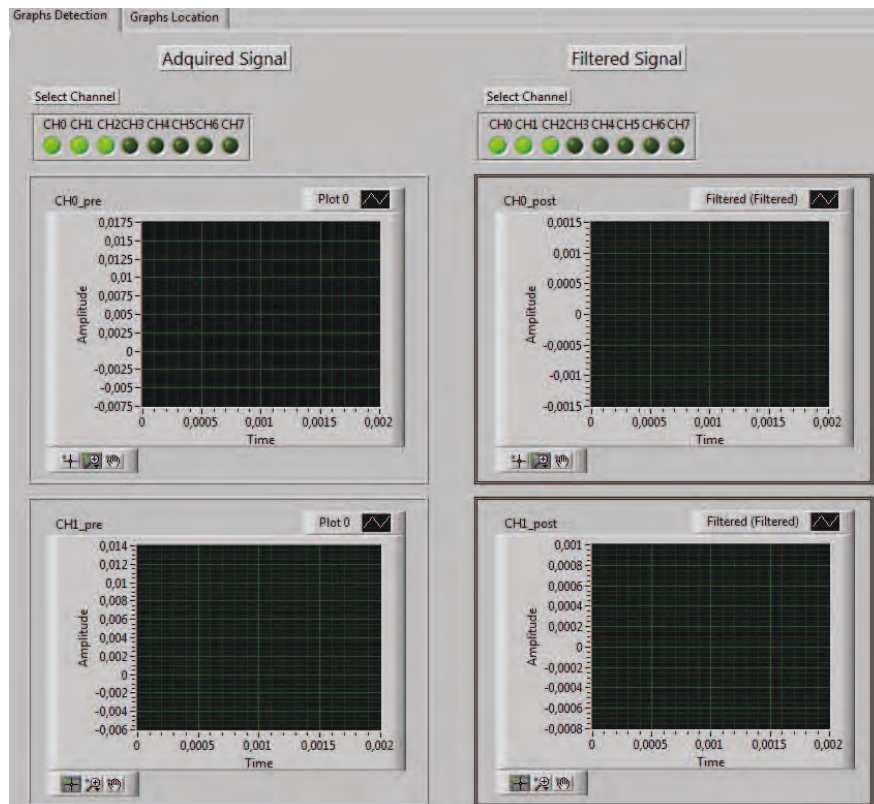


Figura 4.12. Panel para la selección de canales a visualizar.

### 4.2.3. Etapa de identificación de descargas parciales

En el caso particular de estudio de medidas acústicas de PDs, se ha completado la estructura básica de la Figura 4.1 con una etapa en paralelo que permite la identificación del tipo de PD (Figura 4.13). Para ello, se ha implementado un patrón PRPD (Phase Resolved Partial Discharge – Descarga Parcial Resuelta en Fase) acústico.



Figura 4.13. Estructura básica con identificación de PDs.

Para poder representar el patrón de descargas referidas a la fase de red es necesario disponer de una referencia de dicha fase. Con este fin se ha diseñado un hardware que genera una señal rampa, la cual nos proporciona la referencia de red como se muestra en la Figura 4.14.

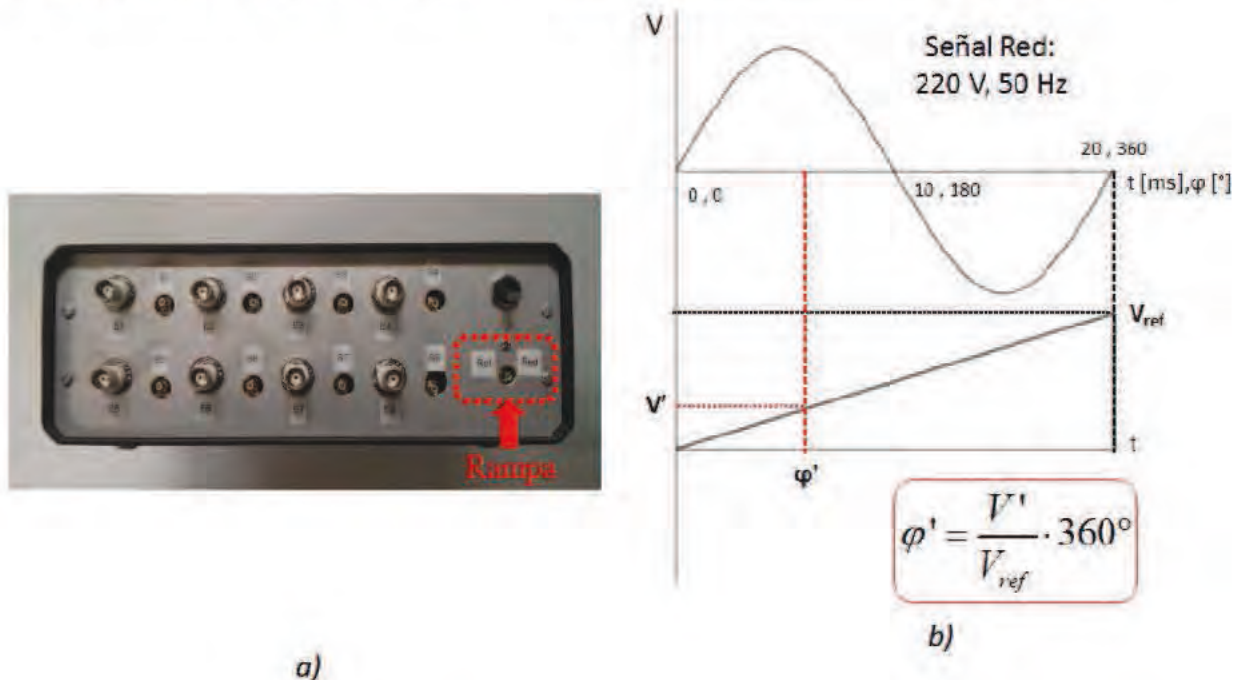
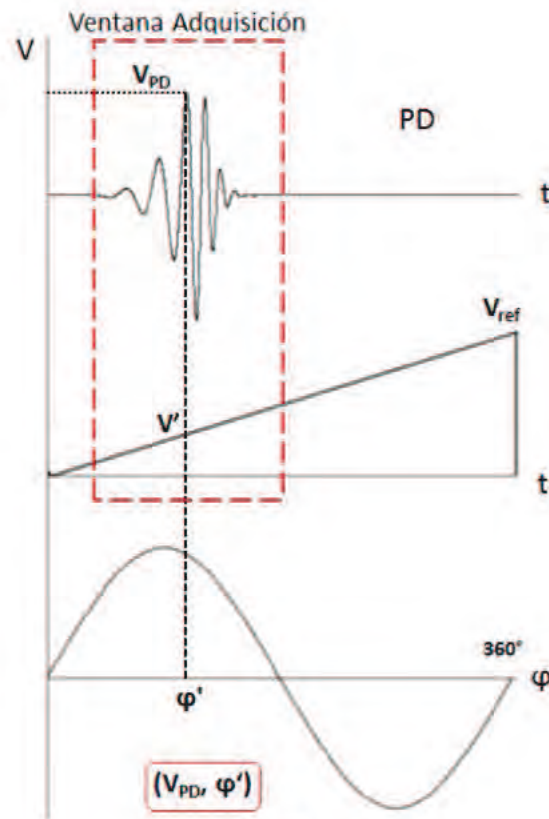
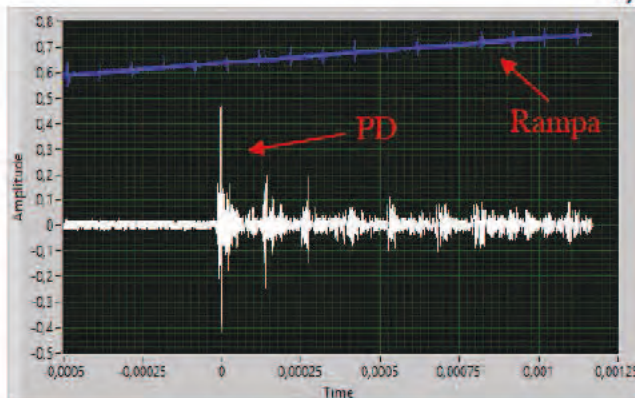


Figura 4.14. Hardware generador rampa (referencia de red) a), relación rampa/señal red b).

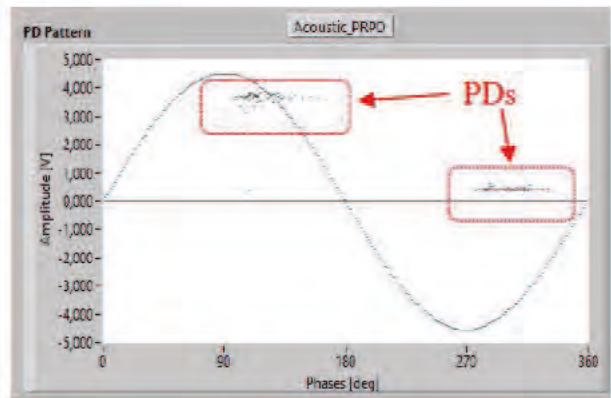
Los parámetros necesarios para graficar el patrón (Figura 4.15a)) son: la tensión del pico positivo máximo de la descarga ( $V_{PD}$ ) y la posición-ángulo referida a la red del pico positivo máximo ( $\varphi'$ ).



a)



b)



c)

Figura 4.15. Parámetros patrón PRPD ( $V_{PD}$ ,  $\varphi'$ ) a), gráfico de adquisición de PD b) y representación patrón PRPD acústico c).

El programa para representar el patrón PRPD acústico se ha implementado en LabVIEW y trabaja del siguiente modo: En primer lugar se extraen los parámetros,  $V_{PD}$  y  $\varphi'$ , de las señales adquiridas (Figura 4.15b)) y en segundo lugar se pintan dichos valores en el gráfico del patrón

(Figura 4.15c)). El valor de  $\phi'$  tiene un retardo asociado con el tiempo de llegada de las señales acústicas a los sensores, sin embargo este es despreciable frente al ciclo de red. A diferencia con el patrón eléctrico, el patrón acústico es siempre positivo debido a que las características de las señales acústicas en el ciclo positivo de red son las mismas que en el negativo.

El resultado es una representación acústica de PDs referidas a la fase de red que aporta información sobre el tipo de descarga. Este tipo de patrones hasta la fecha era exclusivo de la detección eléctrica de PDs y ha sido implementado durante la estancia internacional en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Bolonia.

### 4.3. Software de localización de la fuente de emisión acústica

Para abordar esta etapa de localización de AES se han diseñado, implementado y testeado diferentes arquitecturas y técnicas usando diferentes herramientas de programación (LabVIEW y Matlab) con el fin de optimizar el proceso tanto en velocidad de ejecución como en precisión. A continuación se mostrarán con detalle cada una de ellas.

#### 4.3.1. Arquitectura simple (LabVIEW) - Arquitectura 1

En este tipo de arquitectura los algoritmos de localización se implementan íntegramente en un único lenguaje de programación LabVIEW (Figura 4.16).



Figura 4.16. Arquitectura simple (LabVIEW) – Arquitectura 1.

### 4.3.1.1. Localización basada en mallado 3D con refinado progresivo

Este algoritmo, al igual que todos los que se describirán posteriormente, utiliza el método de trilateración espacial empleando los TDOAs para determinar la posición de la AES. Si se dispone de  $k+1$  sensores acústicos,  $k$  sensores + 1 sensor de referencia (el más cercano a la fuente de emisión), el sistema de ecuaciones de trilateración (26) se resuelve por barrido de  $(x, y, z)$ , tratando por separado las  $k$  ecuaciones resultantes de la combinación del sensor de referencia con los restantes, el objetivo es eliminar la incógnita  $T$ . Para ello se realizan las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned}
 (x - x_{REF})^2 + (y - y_{REF})^2 + (z - z_{REF})^2 &= (v_s \cdot T)^2 \\
 (x - x_{S_k})^2 + (y - y_{S_k})^2 + (z - z_{S_k})^2 &= (v_s \cdot (T + \tau_k))^2 \\
 \Downarrow \\
 \sqrt{(x - x_{REF})^2 + (y - y_{REF})^2 + (z - z_{REF})^2} &= v_s \cdot T \\
 \sqrt{(x - x_{S_k})^2 + (y - y_{S_k})^2 + (z - z_{S_k})^2} &= v_s \cdot T + v_s \cdot \tau_k \\
 \Downarrow (-) \\
 \sqrt{(x - x_{S_k})^2 + (y - y_{S_k})^2 + (z - z_{S_k})^2} - \\
 -\sqrt{(x - x_{REF})^2 + (y - y_{REF})^2 + (z - z_{REF})^2} - v_s \cdot \tau_k &= 0
 \end{aligned} \tag{50}$$

De este modo, tendremos  $k$  ecuaciones analizadas por separado y cuyas soluciones serán tratadas en común para determinar la localización de la emisión acústica.

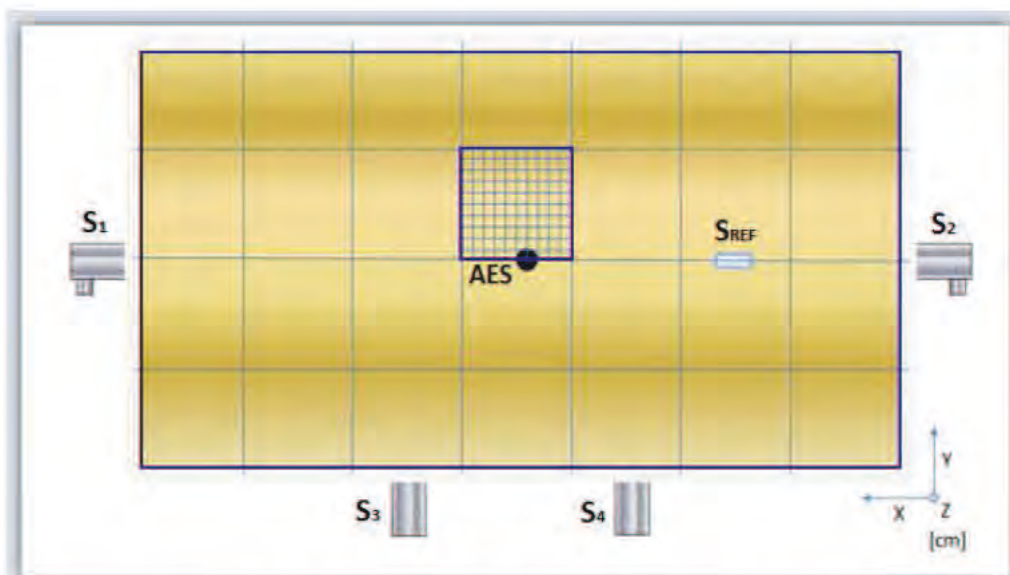


Figura 4.17. Modelo de algoritmo basado en mallado 3D con refinado progresivo.

El algoritmo se divide en dos partes. Una primera parte en la que se realiza una localización gruesa ( $XxYxZ \text{ dm}$  – Tamaño del tanque usado) y una segunda parte en la que se lleva a cabo una localización más fina ( $10x10x10 \text{ cm}$ ) como muestra la Figura 4.17. El objetivo de este método es reducir el tiempo de cómputo.

Sin embargo, en ocasiones el algoritmo es incapaz de obtener una solución válida, provocada por las múltiples alternativas que arroja, por lo que surge la necesidad de incluir y adaptar los conceptos de centro de masas, centro de gravedad y centroide para determinar el punto en que se encuentra la fuente de emisión acústica. Con el objetivo de determinar las coordenadas de la fuente de emisión se aplica la ecuación del centro de masas a cada coordenada por separado:

$$s_c = \frac{\sum_i n_{c_i} \cdot i}{\sum_i n_{c_i}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i n_{c_i} \cdot i \quad (51)$$

donde  $c$  es la coordenada  $x$ ,  $y$  o  $z$ ,  $i$  es el valor de la coordenada (en  $\text{dm}$   $x \rightarrow i \in [0, X)$ ,  $y \rightarrow i \in [0, Y)$ ,  $z \rightarrow i \in [0, Z)$ ),  $n_{c_i}$  el número total de soluciones para cada valor de cada coordenada y  $N$  el número total de soluciones. Este método se aplica tres veces ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) para determinar el valor de cada coordenada.  $s_c$  se obtiene aplicando la ecuación y realizando un redondeo normal ( $c=a.b \rightarrow$  si  $b < 5$   $c=a$  y si  $b \geq 5$   $c=a+1$ ).

El fragmento del programa que calcula el centro de masas es el del Anexo II.

El panel principal que permite configurar los elementos necesarios para realizar la localización es el mostrado en la Figura 4.19. Dimensiones de la cuba ( $\text{cm}$ ) (1), velocidad del sonido en el medio ( $\text{cm}/\mu\text{s}$ ) (2), coordenadas de los sensores ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  en  $\text{cm}$ ) (3), controles de parada del sistema (4), refinado de TDOAs (descarta aquellos que se desvíen un valor máximo de la media de cada canal) (5), modo de entrada de TDOAs (manual o experimental (sin procesado o con procesado)) (6) y posición definida del emisor (7).

El panel frontal diseñado dispone, también, de una pestaña que muestra como resultado la solución que más se repita y la media de todas las soluciones (la media de cada coordenada por separado), la representación gráfica 3D de las soluciones individuales y un análisis estadístico de las mismas (Figura 4.20).



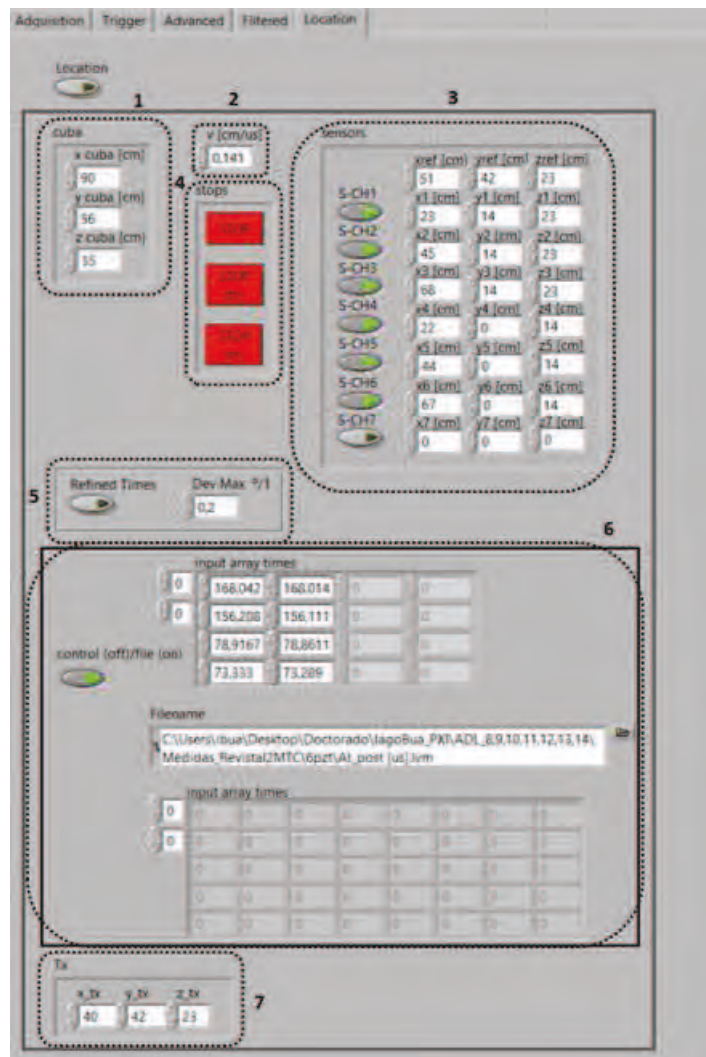


Figura 4.19. Panel de configuración de la localización.

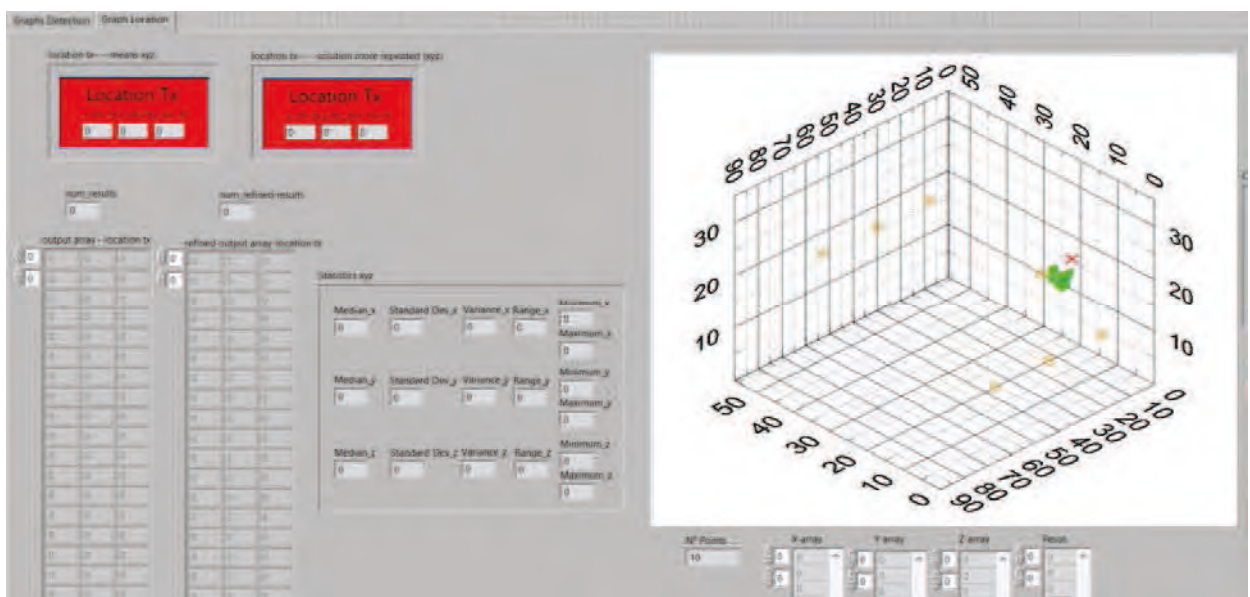


Figura 4.20. Panel de localización.

### 4.3.1.2. Localización basada en tablas de diferencias de tiempos de llegada

Con el fin de mejorar el proceso de localización, incrementando la precisión y reduciendo el tiempo de cómputo, se ha implementado un algoritmo basado en LUTs de TDOAs.

$$(x - x_{REF})^2 + (y - y_{REF})^2 + (z - z_{REF})^2 = (v_s \cdot T)^2 \quad (52)$$

$$(x - x_{Sk})^2 + (y - y_{Sk})^2 + (z - z_{Sk})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_k))^2, k = 1..N \quad (53)$$

El método emplea el sistema de ecuaciones de localización, (52-53), para construir tablas (LUTs) de TDOAs. Las tablas son una réplica del tanque analizado ( $k=1..N$  LUTs como las mostradas en la Figura 4.21), por lo que cada posición  $(x, y, z)$  en la tabla se corresponde con cada posición en el tanque  $(x, y, z)$ . De este modo, las tablas se rellenan con TDOAs resolviendo las ecuaciones para cada posición  $(x, y, z)$ . La ubicación de la fuente se obtiene comparando el vector medido de TDOAs con los TDOAs de las LUTs.

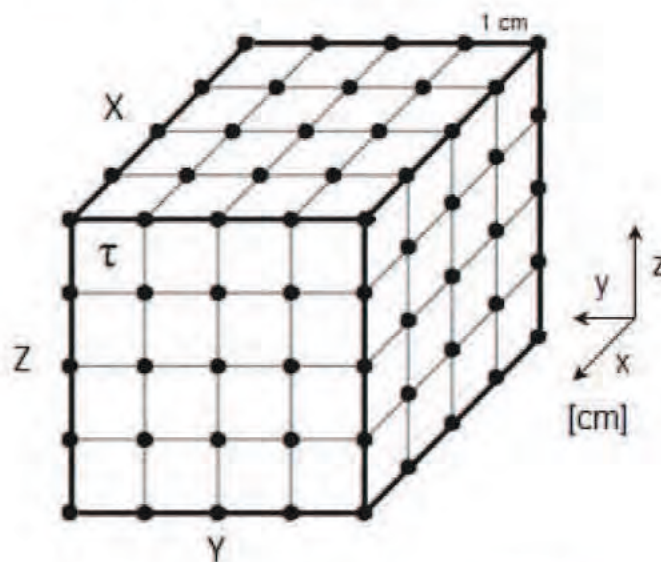


Figura 4.21. Modelo del tanque (LUT 3D).

Los TDOAs de las LUTs se calculan restando (53) – (52) y despejando el TDOA ( $\tau_k$ ):

$$\tau_k^{LUT}(x, y, z) = \frac{\sqrt{(x - x_{Sk})^2 + (y - y_{Sk})^2 + (z - z_{Sk})^2} - \sqrt{(x - x_{REF})^2 + (y - y_{REF})^2 + (z - z_{REF})^2}}{v_s}, k = 1..N \quad (54)$$

La solución más adecuada es la que cumple:

$$(x, y, z) / \min \left( \sum_{k=1}^N |\tau_k^{LUT}(x, y, z) - \tau_k| \right), x \in [0, X) \ y \in [0, Y) \ z \in [0, Z) \quad (55)$$

donde  $(x, y, z)$  es la posición de la AES,  $\tau_k$  son los TDOAs medidos,  $\tau_k^{LUT}(x, y, z)$  son los TDOAs de las LUTs.

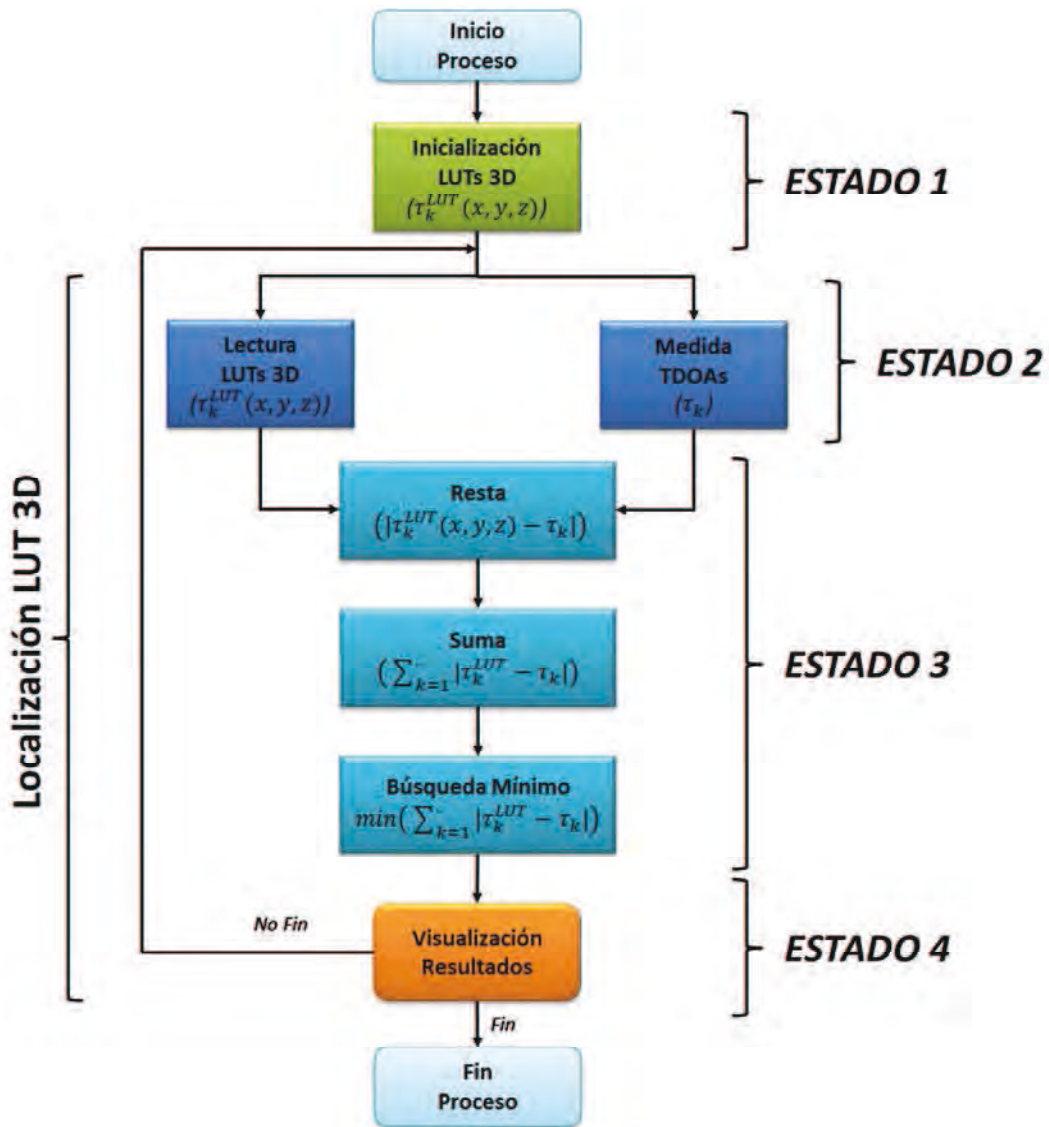


Figura 4.22. Diagrama de flujo del proceso de localización.

La Figura 4.22 muestra el diagrama de flujo del proceso de localización, el cual consiste en cuatro estados. El primero de inicialización, se construyen las LUTs 3D mediante la ecuación (54) considerando la velocidad del sonido en el medio, las dimensiones del tanque y las posiciones de los sensores. El segundo estado es de lectura y medida, por un lado se leen las LUTs 3D ( $\tau_k^{LUT}(x, y, z)$ ) y por otro se miden los TDOAs ( $\tau_k$ ). Un tercer estado de operación y búsqueda, en primer lugar se calcula la desviación de tiempos restando los TDOAs medidos a los TDOAs de las tablas para cada sensor ( $|\tau_k^{LUT}(x, y, z) - \tau_k|$ ), en segundo lugar se suman las matrices de desviación de tiempos de todos los sensores ( $\sum_{k=1} |\tau_k^{LUT}(x, y, z) - \tau_k|$ ) y por último se busca la desviación de tiempo mínima en la matriz suma (ecuación (55)). En el último estado se muestran y almacenan los resultados del proceso de localización.

Los paneles de configuración y localización de este algoritmo son similares a los de las Figuras 4.19 y 4.20.

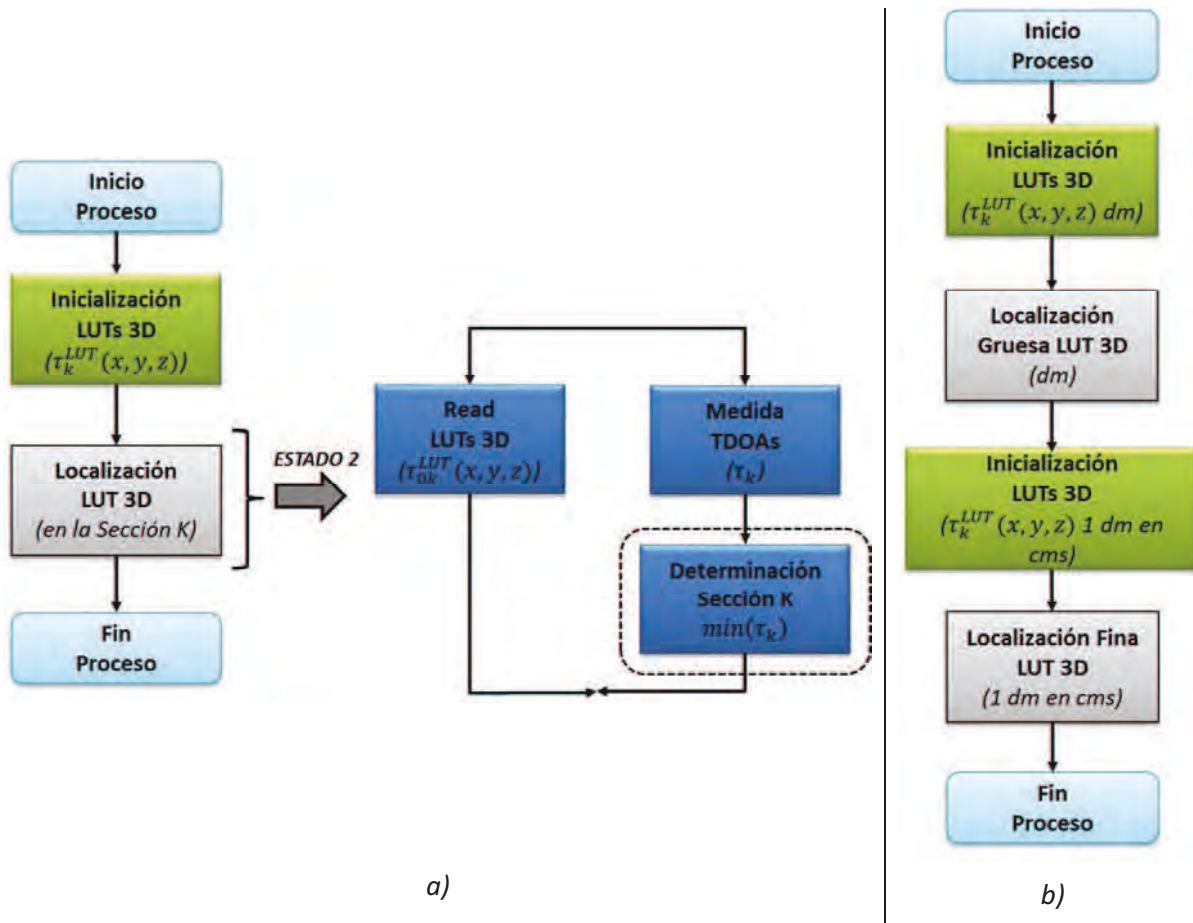


Figura 4.23. Diagramas de flujo alternativos: a) búsqueda por secciones y b) búsqueda con refinado progresivo.

En la Figura 4.23 se describen también dos alternativas. La primera de ellas usa búsqueda por secciones, es decir, se divide el tanque en secciones asociadas a cada sensor (Figura 4.24) y la solución solo se busca en la sección del sensor más cercano ( $\min(\tau_k)$ ), excluyendo el sensor de referencia. Este método reduce el tiempo de búsqueda y está directamente conectado con la aplicación real de un transformador trifásico.

La segunda alternativa emplea la misma metodología de refinado progresivo que el algoritmo del apartado 4.31.1 pero usando búsqueda en LUTs 3D.

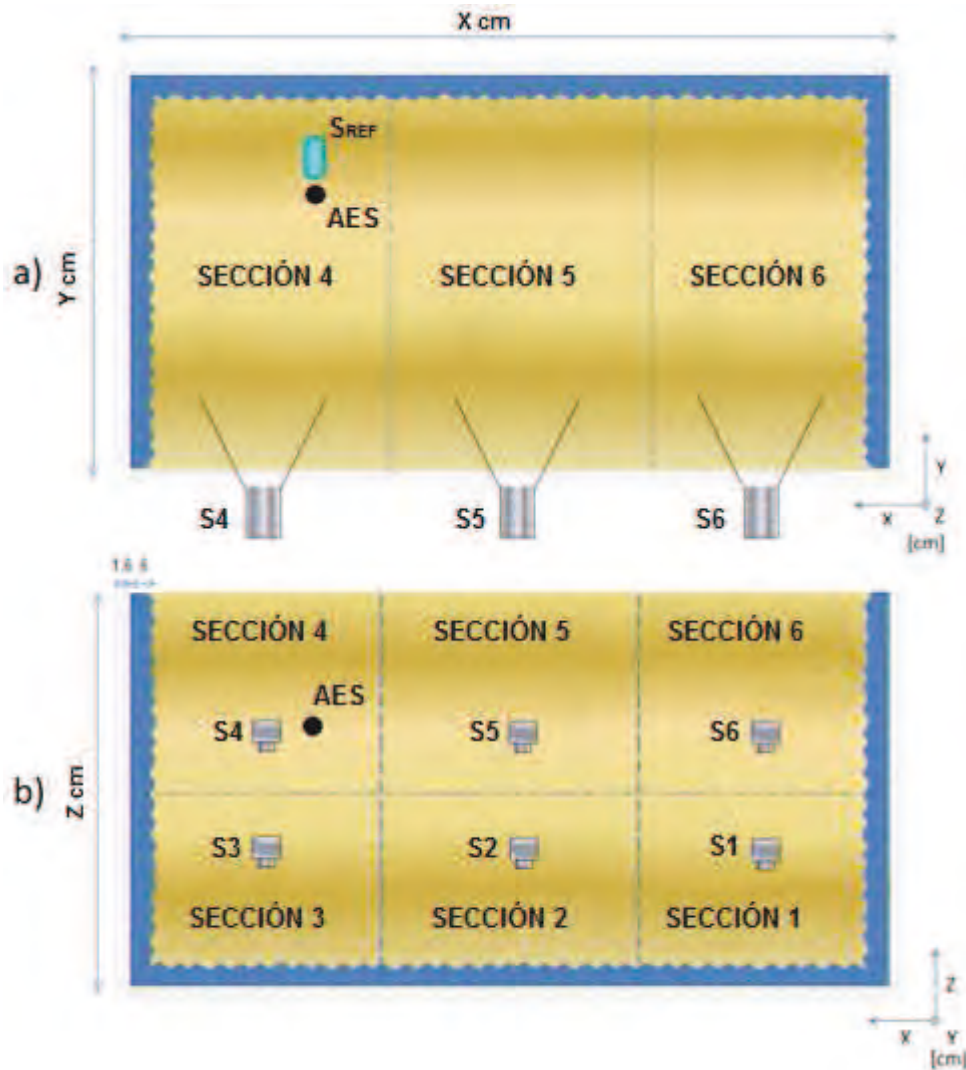


Figura 4.24. Plataforma experimental de localización de AES a) planta y b) alzado.

### 4.3.2. Arquitectura mixta/híbrida (LabVIEW - Matlab) - Arquitectura 2

Siguiendo la misma línea de investigación que consiste en optimizar el proceso de localización de AES, mejorando en velocidad de ejecución y en precisión, se diseña un software híbrido con una arquitectura mixta LabVIEW/Matlab basada en comunicación TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) que va integrado en un sistema de adquisición multicanal como el mostrado en la Figura 4.25.

## SISTEMA DE ADQUISICIÓN MULTICANAL



Figura 4.25. Sistema de adquisición multicanal con software de programación híbrido.

El sistema de programación híbrido sigue la Arquitectura 2 y consta de dos fases. En la primera se realiza la detección, el procesamiento para la reducción de ruido y la extracción de información en bruto para la localización (TOAs) en LabVIEW y en la segunda se efectúa la localización de la AES en Matlab como se muestra en la Figura 4.26.

### Arquitectura Híbrida (LabVIEW - Matlab)

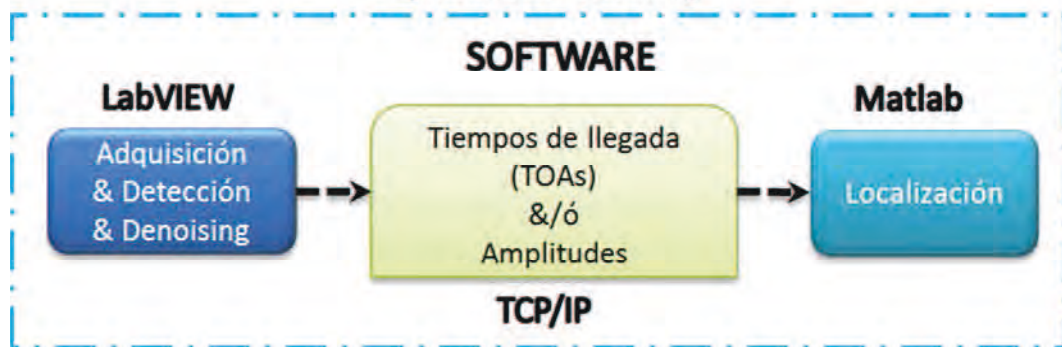


Figura 4.26. Arquitectura híbrida (LabVIEW - Matlab) – Arquitectura 2.

En la fase de detección LabVIEW se obtienen los tiempos de llegada (TOAs) de todos y cada uno de los canales y de todos y cada uno de los eventos acústicos. Esta fase permite extraer también otra información relevante, como puede ser la amplitud de la AE. En la segunda fase (localización Matlab), se lleva a cabo la localización de la AES resolviendo del sistema de

ecuaciones de trilateración 3D. Con esta arquitectura no es necesario establecer de antemano el sensor de referencia, como lo hacía la arquitectura simple (LabVIEW), ya que es el propio software Matlab el que se encarga de determinarlo. La comunicación entre ambas fases (LabVIEW - Matlab) se realiza de manera eficiente a través del conjunto de protocolos de red para transferencia de datos TCP / IP y se centra principalmente en el envío de la información contenida en los TOAs. De este modo, se obtiene localización en tiempo real de la AES. Además, el uso de este protocolo de comunicaciones hace posible el análisis remoto de datos. En la Figure 4.27 se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso.

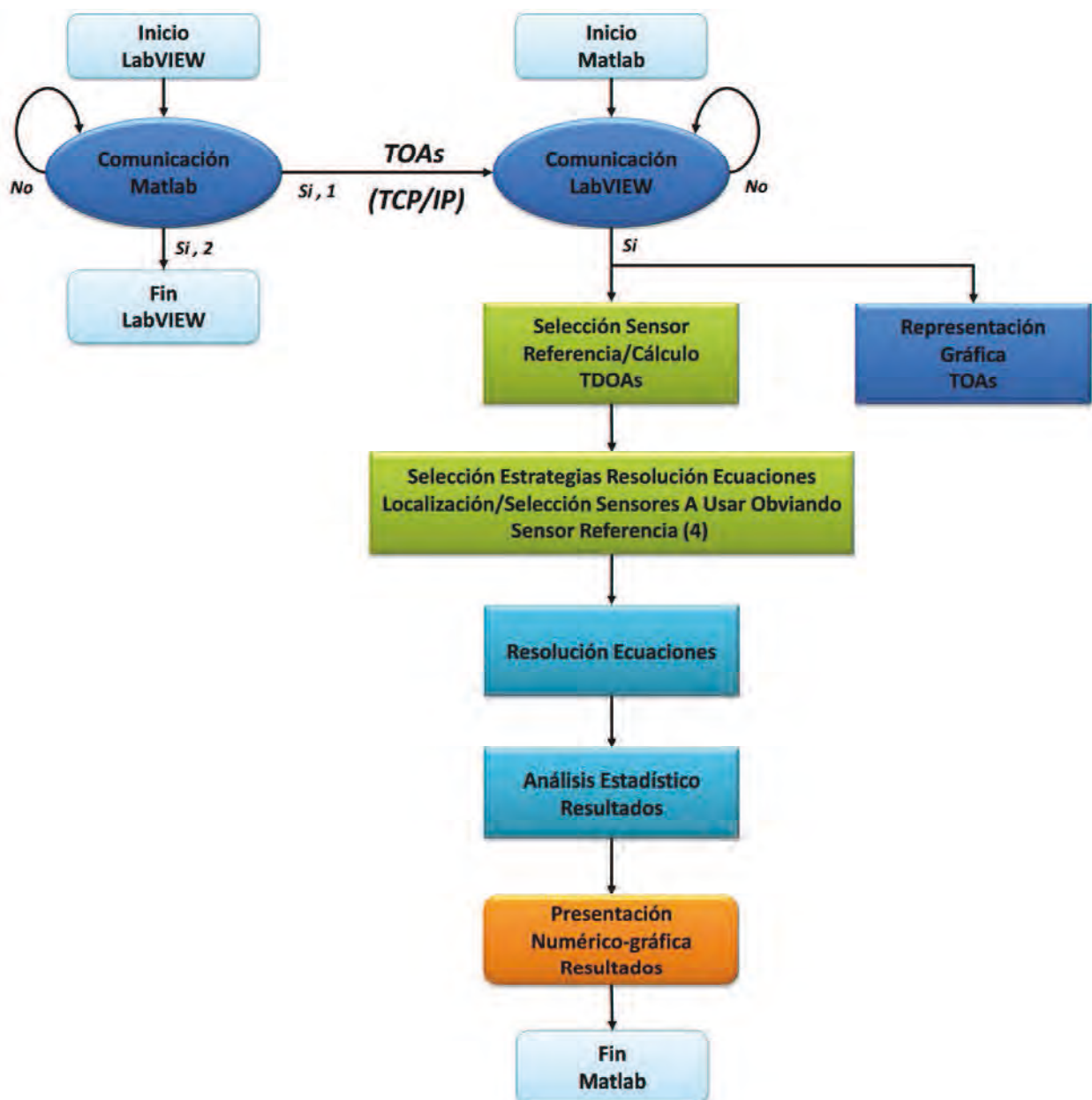


Figura 4.27. Diagrama de flujo del sistema de programación híbrido.

El Anexo III refleja el diagrama de bloques del instrumento virtual implementado para el envío de información mediante TCP/IP. Está constituido por cuatro bloques: Configuración de entrada de TOAs (desde fichero o directa), establecimiento de conexión (mediante nombre y puerto), envío de información (TOAs) y cierre de conexión.

Matlab es una herramienta de cálculo numérico especializada en el procesamiento y representación de datos. Esto permite implementar cualquier método de resolución de ecuaciones de localización como mínimos cuadrados (Least Squares - LS), Cramer, optimización por nube de partículas (Particle Swarm Optimization - PSO), etc.

Con este sistema se mejora la resolución, situándola en *1 mm*.



# Capítulo 5

## Resultados experimentales

En este capítulo se describen los experimentos más destacados de la fase de investigación y se analizan los resultados obtenidos. Abarcan los siguientes apartados: caracterización del sistema de medida, medidas en instalaciones de alta tensión HVDC y análisis de prestaciones para dos arquitecturas de localización.

### 5.1. Caracterización del sistema

El trabajo, expuesto en este apartado, describe y caracteriza un sistema de instrumentación con adquisición multicanal y denoising para la detección y localización de AEs. El sistema incluye diferentes tipos de sensores acústicos, un sensor de OF (apartado 4.1.2) y cuatro sensores PZT (apartado 4.1.1). Se propone un sistema de procesado que incluye técnicas de denoising (apartado 4.2.2) y algoritmos de localización (apartado 4.3.1.1) implementados con instrumentación virtual. Por último, se usa una plataforma experimental para caracterizar el funcionamiento del sistema de instrumentación con diferentes tipos de señales y con diferentes relaciones señal/ruido.

### 5.1.1. Configuración del experimento

Se ha empleado un esquema experimental constituido por una plataforma experimental y un sistema de adquisición multicanal como el mostrado en la Figura 5.1 y Figura 5.2 [5.1].

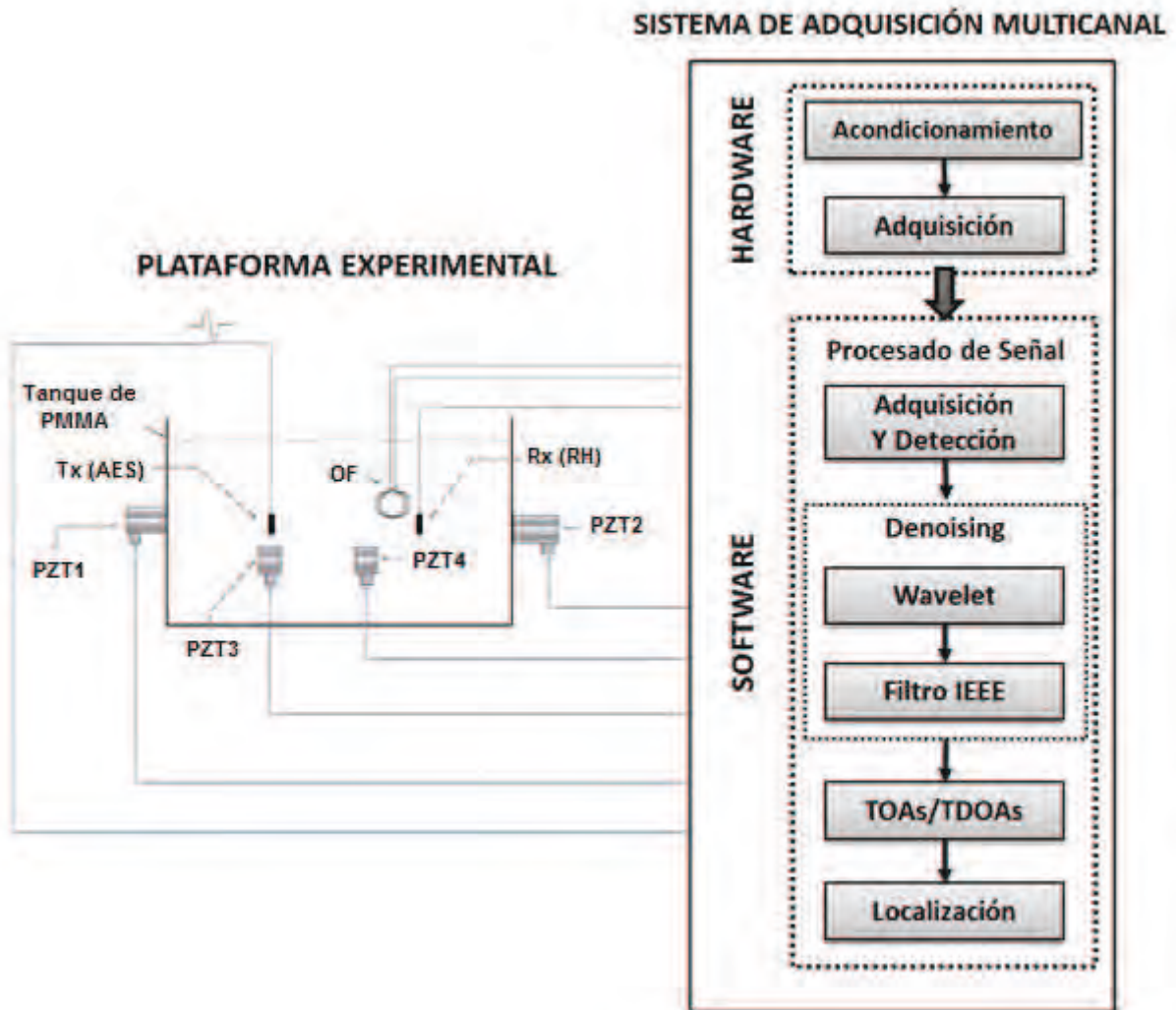


Figura 5.1. Sistema de instrumentación multicanal para la detección y localización de AEs.

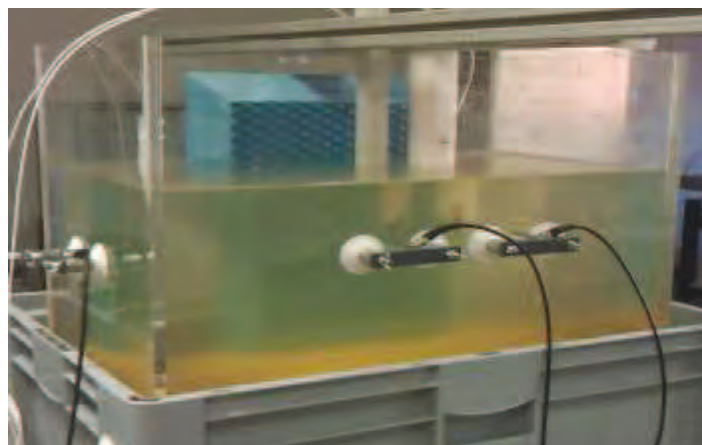


Figura 5.2. Plataforma de pruebas acústicas.

La plataforma experimental consiste principalmente en un recipiente con forma cúbica, cuyas dimensiones efectivas son  $70\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ . Las paredes del recipiente son de PMMA (polimetilmetacrilato) y tienen un espesor de  $1.5\text{ cm}$ . Incluye cuatro sensores PZT (R15I-AST) en las paredes del tanque, un sensor de OF en el interior [5.2] y un hidrófono receptor (Receiver Hydrophone - RH) también en el interior de tanque. Como fuente de AEs se emplea un generador de ondas aplicado a un transductor ultrasónico PZT (B&K 8103/ Anexo I).

El sistema de adquisición multicanal integra un hardware de acondicionamiento y adquisición (apartado 4.1.3), y un software de detección y localización de AEs.

### 5.1.2. Análisis de la dispersión de los tiempos de llegada

El objetivo es analizar la precisión en la localización de AEs poniendo a prueba tanto el sistema de denoising (apartado 4.2.2) como el algoritmo de localización (apartado 4.3.1.1) (Figura 5.3). Para ello, se han realizado experimentos de análisis de dispersión utilizando la instalación descrita en la Figura 5.1.

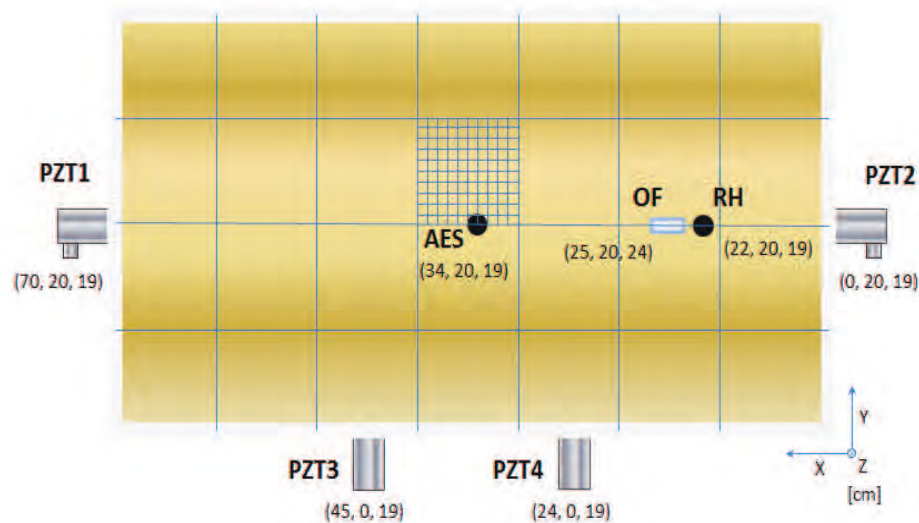


Figura 5.3. Plataforma experimental para la localización de la AES.

En este apartado, se analiza la precisión en la localización a través de la dispersión de los tiempos de llegada. En las diversas pruebas realizadas se comparan los resultados con y sin procesamiento de denoising.

Una regla muy extendida es fijar el umbral de detección en tres veces la amplitud del ruido. En este caso, se ajusta la amplitud de la señal emitida a niveles inferiores (Amplitud de Señal / Amplitud de Ruido –  $SN < 3$ ) con el fin de analizar los beneficios de procesamiento sobre las señales recibidas, incluso con aquellas con niveles por debajo del ruido.

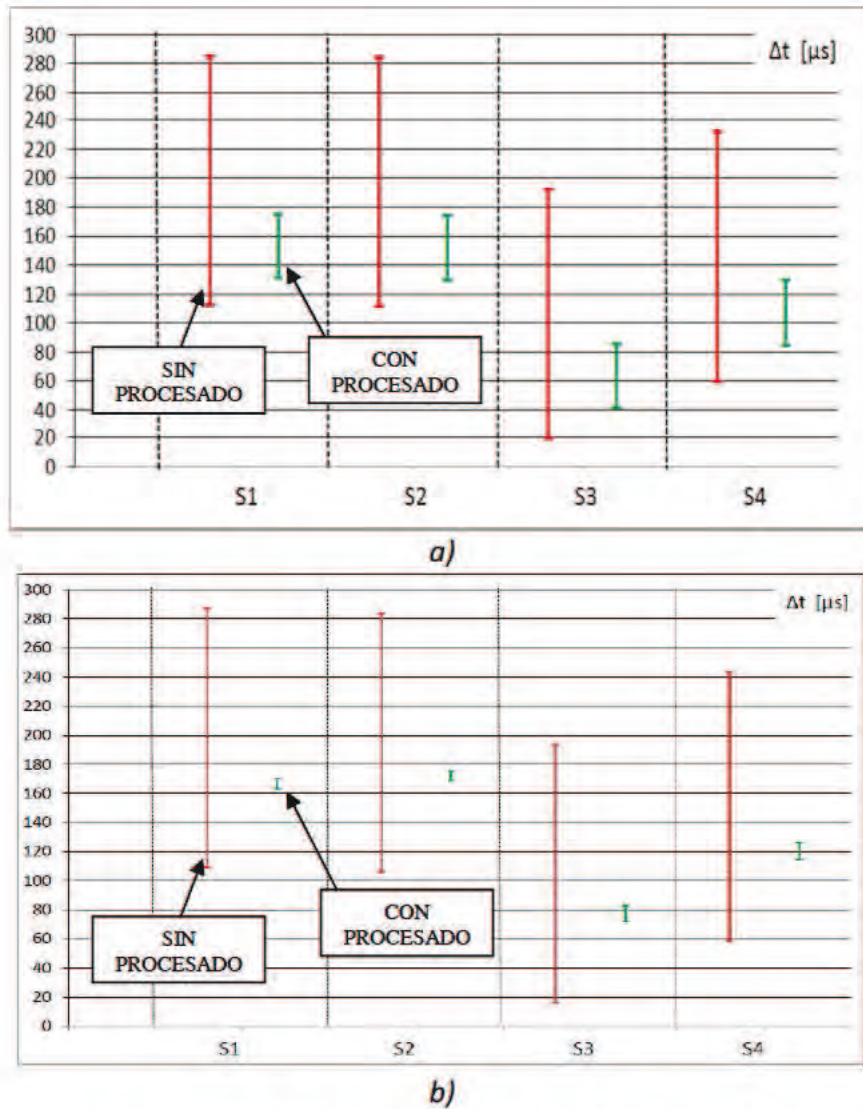


Figura 5.4. Resultados de la dispersión de los TDOAs de cada PZT (S1-S4) con el sensor de OF (64 Pa) como referencia de tiempo en a) y con el RH (18 Pa) en b).

La Figura 5.4 muestra como la influencia de la secuencia de denoising sobre la dispersión de los TDOAs es decisiva (barras de dispersión verdes).

### 5.1.3. Aplicación del algoritmo de localización espacial

Con el fin de analizar el comportamiento del algoritmo de localización, se han realizado las mismas pruebas que en el apartado anterior (242 AEs). En este caso, las características de la plataforma experimental son las representadas en la Figura 5.3.

La Figura 5.5a) muestra una representación 3D de las posiciones resueltas de la AES con 242 medidas. En este caso, se usa el sensor de OF como referencia de tiempo y los TDOAs se calculan sin denoising. Los círculos representan las soluciones desde el mínimo número de

eventos en verde hasta el máximo número de eventos en azul, los cubos naranjas representan los sensores, la equis roja representa la posición real de la AES y el recuadro naranja de la parte superior del gráfico muestra las coordenadas de la solución que más se repite.

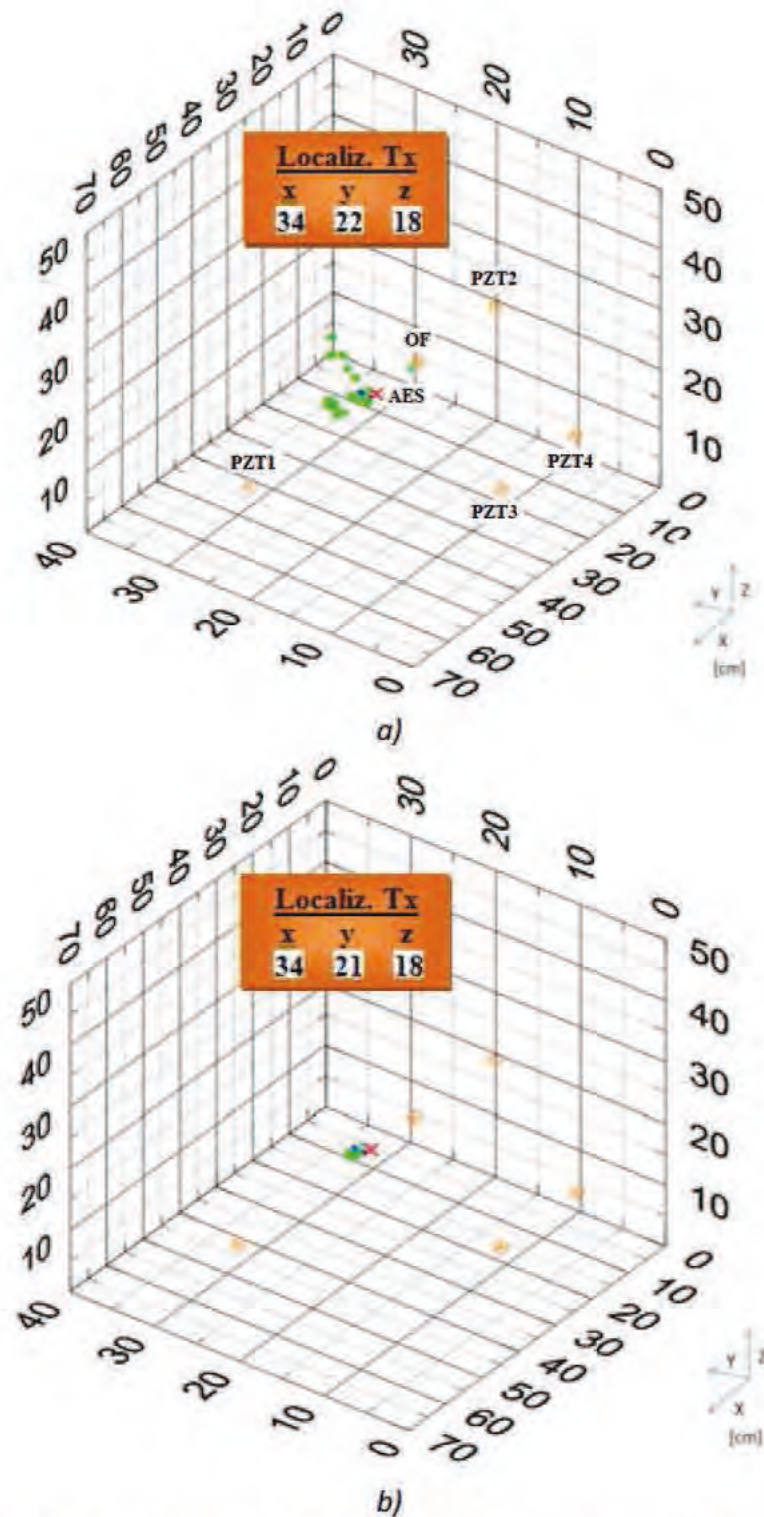
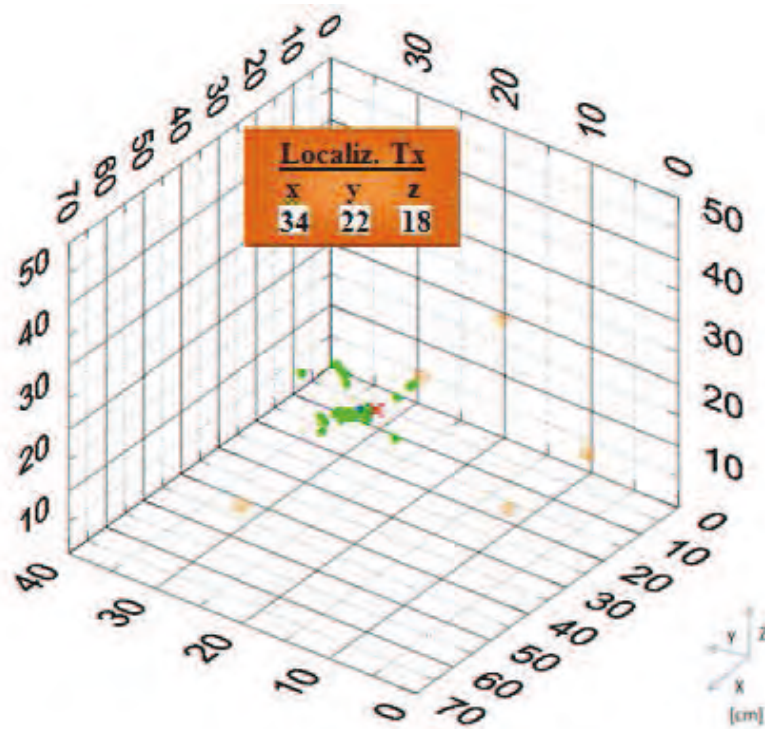
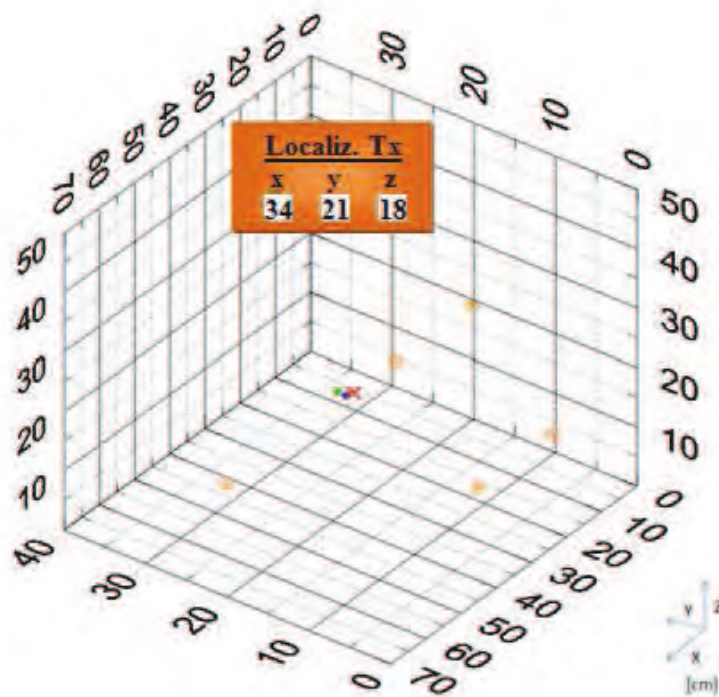


Figura 5.5. Resultados de localización de AES (64 Pa). Tomando el sensor de OF como referencia, sin procesado ( $SN < 3$ ) en a) y con procesado ( $SN \geq 3$ ) en b).

Comparando los resultados sin procesado (Figura 5.5a)) y con procesado (Figura 5.5b)), se puede observar la influencia de la secuencia de denoising en la dispersión de las soluciones del algoritmo. El mismo comportamiento también se refleja en los resultados obtenidos en la Figura 5.6 con el RH como referencia de tiempo.



a)



b)

Figura 5.6. Resultados de localización de AES (18 Pa). Tomando el RH como referencia, sin procesado ( $SN < 3$ ) en a) y con procesado ( $SN \geq 3$ ) en b).

### **5.1.4. Conclusiones**

Se ha caracterizado el sistema de adquisición multicanal que es capaz de monitorizar señales procedentes de diferentes tipos de sensores acústicos de forma simultánea. La secuencia de denoising permite reducir el umbral de detección un orden de magnitud y mejorar la precisión en la determinación de los TOAs. Adicionalmente, se incluye una primera aproximación de localización espacial de AEs (mallado 3D con el refinamiento progresivo). La herramienta diseñada detecta y localiza AEs con una resolución de  $1\text{ cm}$ . El análisis estadístico de los TDOAs y las pruebas realizadas con el algoritmo de localización muestran que el sistema de denoising obtiene una mejora significativa en ambientes ruidosos con señales débiles, reduciendo el umbral de detección y mejorando la precisión en la determinación de los TOAs.

## **5.2. Caracterización de la arquitectura de localización 1.**

En este trabajo se presenta un sistema de instrumentación multicanal para la localización de PDs en transformadores de potencia. El sistema está enfocado en la detección de las AEs de PDs en aceite con varios sensores acústicos, PZTs (apartado 4.1.1) y de OF (apartado 4.1.2). Se propone un enfoque de detección y localización acústicas basado en TDOAs con una referencia temporal dada por un sensor de OF instalado en el interior del tanque y un conjunto de sensores PZT situados fuera del tanque (dos por cada devanado de un transformador trifásico como aplicación típica). El procesado de señal incluye técnicas digitales de denoising (apartado 4.2.2) y algoritmos de localización 3D basadas en LUTs de TDOAs (Arquitectura 1- apartado 4.3.1.2). El sistema se pone a prueba en una plataforma experimental de ensayos acústicos, evaluando la precisión en la localización, la propagación de errores de los TDOAs y la influencia del número de sensores y sus ubicaciones en el algoritmo.

### **5.2.1. Sistema de instrumentación**

El sistema de instrumentación está formado por una plataforma experimental y un sistema de adquisición multicanal [5.3]. La plataforma experimental está constituida principalmente por un recipiente con forma cúbica, cuyas dimensiones son  $103\text{ cm} \times 63\text{ cm} \times 63\text{ cm}$ . Las paredes del

recipiente son de PMMA (polimetilmetacrilato) y tienen un espesor de  $1.5\text{ cm}$ . Una de las ventajas del uso de este material es que permite un mejor acople entre la señal acústica y los sensores externos. Para evitar reflexiones que interfieran en la correcta medida de algunos parámetros del experimento, se ha utilizado un material absorbente acústico de goma de poliuretano (Apltile SF5048 de Precision Acoustics - UK) con  $5\text{ cm}$  de espesor fijado a la cara interna de algunas de las paredes. El tanque se llena de agua hasta los  $37\text{ cm}$ . Como resultado se obtienen unas dimensiones internas de  $90\text{ cm} \times 55\text{ cm} \times 37\text{ cm}$ .

El PMMA es el material más adecuado para las pruebas acústicas y para la caracterización del sistema de instrumentación. Sin embargo, dicho material difiere en algunos aspectos del metal empleado en un tanque de un transformador real: (1) la atenuación de la señal acústica en la pared y (2) el camino de la señal acústica a través de la pared. En cuanto a la atenuación, el sensor de OF no se ve afectado, ya que se encuentra en el interior. Además, el PMMA reduce la diferencia de impedancia acústica con el medio interno y por lo tanto, la atenuación en el PMMA es mucho menor. Para tener en cuenta la atenuación adicional en condiciones reales, se han realizado pruebas de detección en el límite de tres veces la amplitud del ruido. Si la señal es tres veces la amplitud del ruido o mayor, la dispersión de los TOAs a cada PZT es menor del  $1\%$  en todos ellos. Si la señal es incluso menor, pero distinguible del ruido, la dispersión de los TOAs es menor que el  $10\%$ . En lo que respecta a los diferentes caminos que recorre la señal hasta alcanzar el sensor, de nuevo el sensor de OF no se ve afectado ya que va inmerso en el fluido. En el caso de los sensores PZT, el PMMA elimina la ruta alternativa a través de las paredes debido a que la velocidad de propagación del sonido (transversal) para PMMA ( $1,378\text{ m/s}$ ) es menor que la velocidad de propagación del sonido para el aceite ( $1,410\text{ m/s}$ ). Este aspecto es diferente en un tanque metálico, sin embargo el filtrado de frecuencias bajas es capaz de atenuar posibles caminos a través de las paredes.

Para emular una PD se ha utilizado un generador de onda aplicado a un transductor ultrasónico PZT (B&K 8103/ Anexo I) que trabaja como emisor. Las características de las señales ultrasónicas generadas por el transductor son similares a las de las AEs de PDs [5.4].



## SISTEMA DE ADQUISICIÓN MULTICANAL

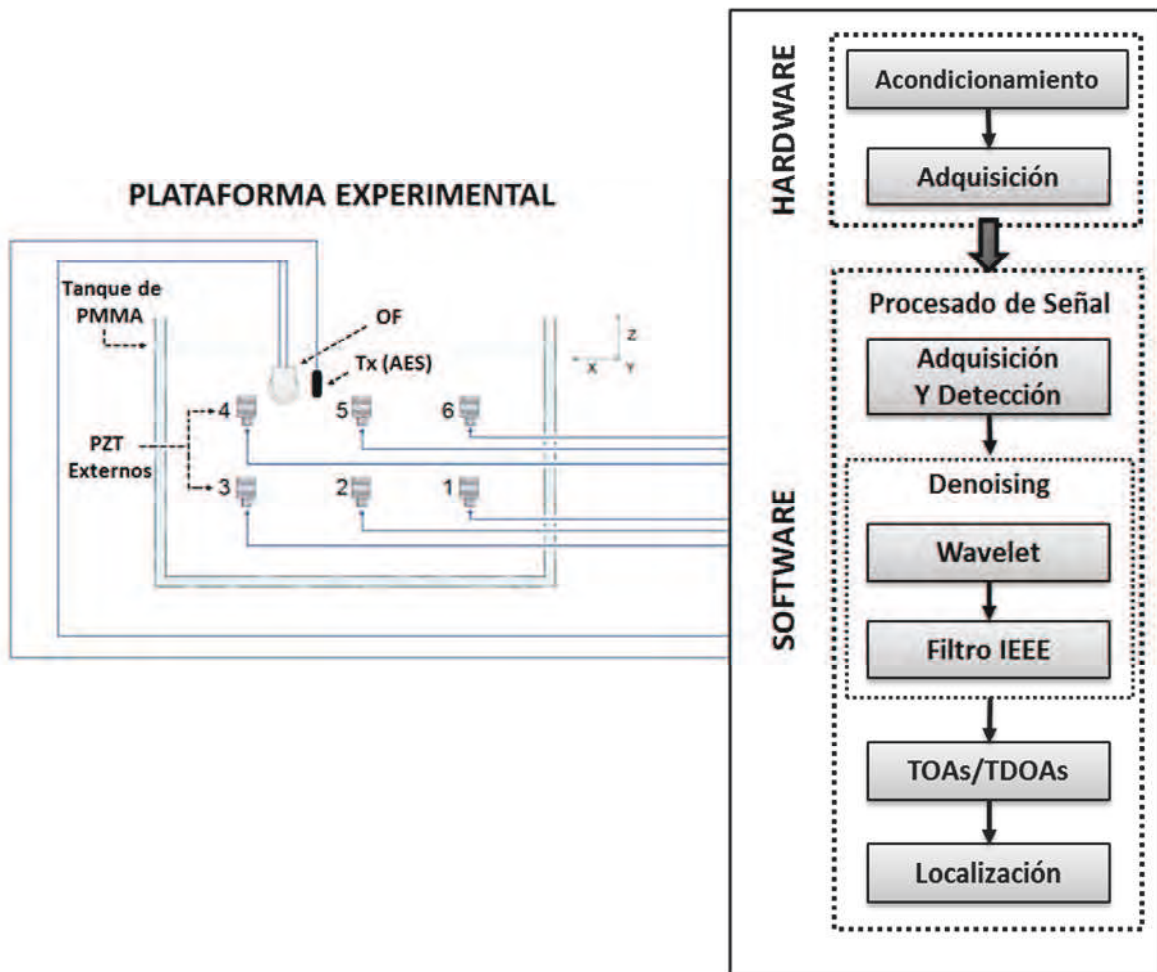


Figura 5.7. Sistema de instrumentación multicanal para la detección y localización de AES.

En este caso, se usaron seis sensores PZT (R15I-AST) fijados a la cara exterior de una de las paredes del tanque y un sensor de OF inmerso en el medio aislante que sirve como referencia de tiempos en el cálculo de los TDOAs. El número mínimo de sensores para llevar a cabo la localización de la AES con el método empleado es: cuatro sensores PZT en el exterior y un sensor de OF en el interior. Sin embargo, se ha elegido un set de dos sensores por fase (seis sensores) y el sensor de OF considerando un esquema trifásico (Figura 4.23). La Figura 5.7 muestra el esquema experimental implementado, que está compuesto principalmente por un tanque instrumentado por sensores PZT en las paredes, un sensor de OF en el interior y un sistema de medida multicanal. Este último está constituido por una sección hardware de acondicionamiento y adquisición de la señal acústica, y una sección software (Arquitectura 1) que proporciona la reducción de ruido (denoising) en la señal acústica y la localización de la AES.

### 5.2.2. Configuración del experimento

En este caso, el esquema experimental está formado por seis sensores PZT (R15I) fijados a la cara externa de una de las paredes de tanque y un sensor OF inmerso en el medio aislante. El mínimo número de sensores debe ser cuatro PZTs en el exterior y un sensor OF en el interior. Sin embargo, en un esquema trifásico se consideran un conjunto de dos sensores por fase (seis) y el sensor OF (Figura 4.24 y Figura 5.8).



Figura 5.8. Detalle del experimento para la detección y localización de AEs.

Las posiciones de los sensores son las mostradas en la TABLA II.

TABLA II. POSICIONES DE LOS SENSORES

Sensor	OF	PZT1	PZT2	PZT3	PZT4	PZT5	PZT6
Posición x,y,z (cm)	66,50,26	22,0,13	44,0,13	67,0,13	67,0,24	44,0,24	22,0,24

### 5.2.3. Análisis de la precisión en la localización

El objetivo es poner a prueba el sistema de instrumentación implementado centrándose en la etapa de localización de AEs. Para ello, se realizan experimentos de precisión, propagación de errores e influencia de la colocación de los sensores, aplicando el algoritmo de localización 3D (apartado 4.3.1.2).

Con el fin de analizar la precisión en la localización de AEs, se aplica el algoritmo a los TDOAs de 41 medidas acústicas detectadas en cada sensor. En la Figura 5.7, Figura 4.24 y Figura 5.8 se muestra la instalación en la cual se lleva a cabo el experimento.

La señal aplicada al emisor, ubicado  $(X_{AES}, Y_{AES}, Z_{AES})$ , es una señal *burst* de 150 kHz y 6  $V_{p-p}$ .

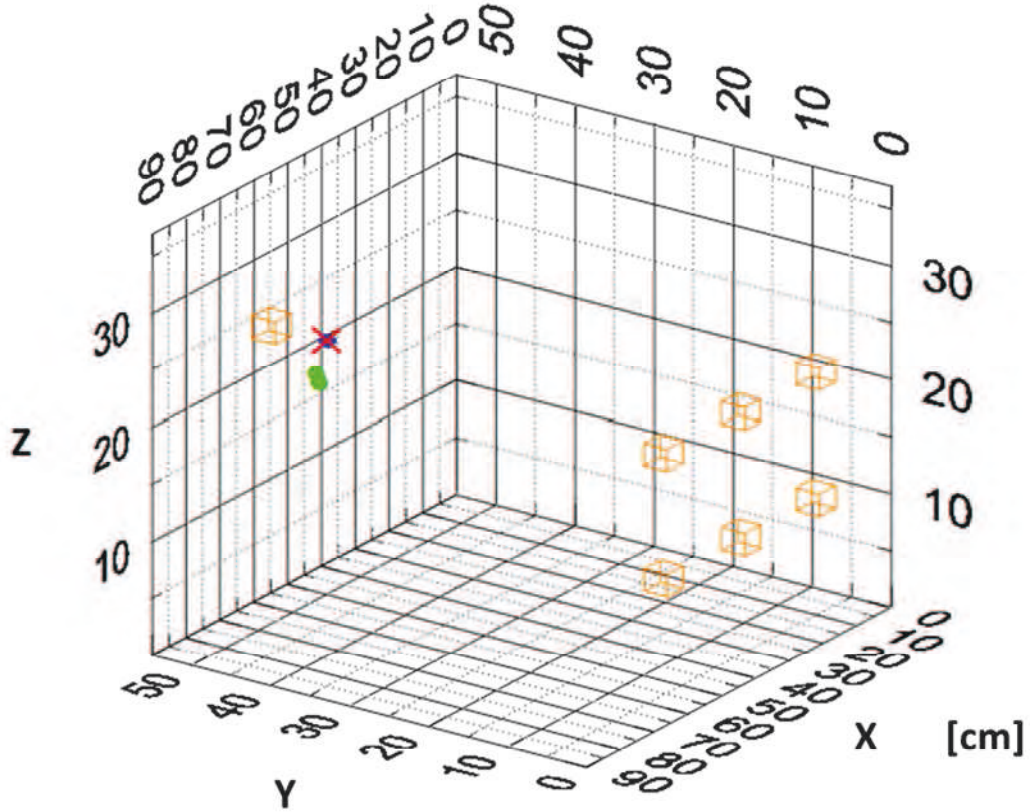


Figura 5.9. Localización de AES.

La Figura 5.9 muestra la representación 3D de las soluciones del algoritmo. Los círculos representan las soluciones desde el mínimo número de eventos en verde hasta el máximo número de eventos en azul, los cubos naranjas representan los sensores y la equis roja representa la posición real de la AES. Como se puede ver, 39 de 41 soluciones resuelven el mismo punto para la localización de la AES con una resolución de 1 cm. Adicionalmente, estas 39 soluciones coinciden con la posición calibrada  $(X_{AES}, Y_{AES}, Z_{AES}) = (66, 43, 26)$ .

Para entender mejor el funcionamiento del algoritmo se ha efectuado la representación 2D (X y Z) de la matriz de desviación de tiempos  $(M(x, y = 43, z) = \sum_{k=1}^6 |\tau_{0k}^{LUT}(x, y = 43, z) - \tau_{0k}|)$  fijando la coordenada y a su valor real ( $y = 43$ ). En la Figura 5.10 se representa el gradiente de la solución de la siguiente manera:

$$M'(x, y = 43, z) = \frac{\max(M(x, y = 43, z))}{M(x, y = 43, z)} \quad (56)$$

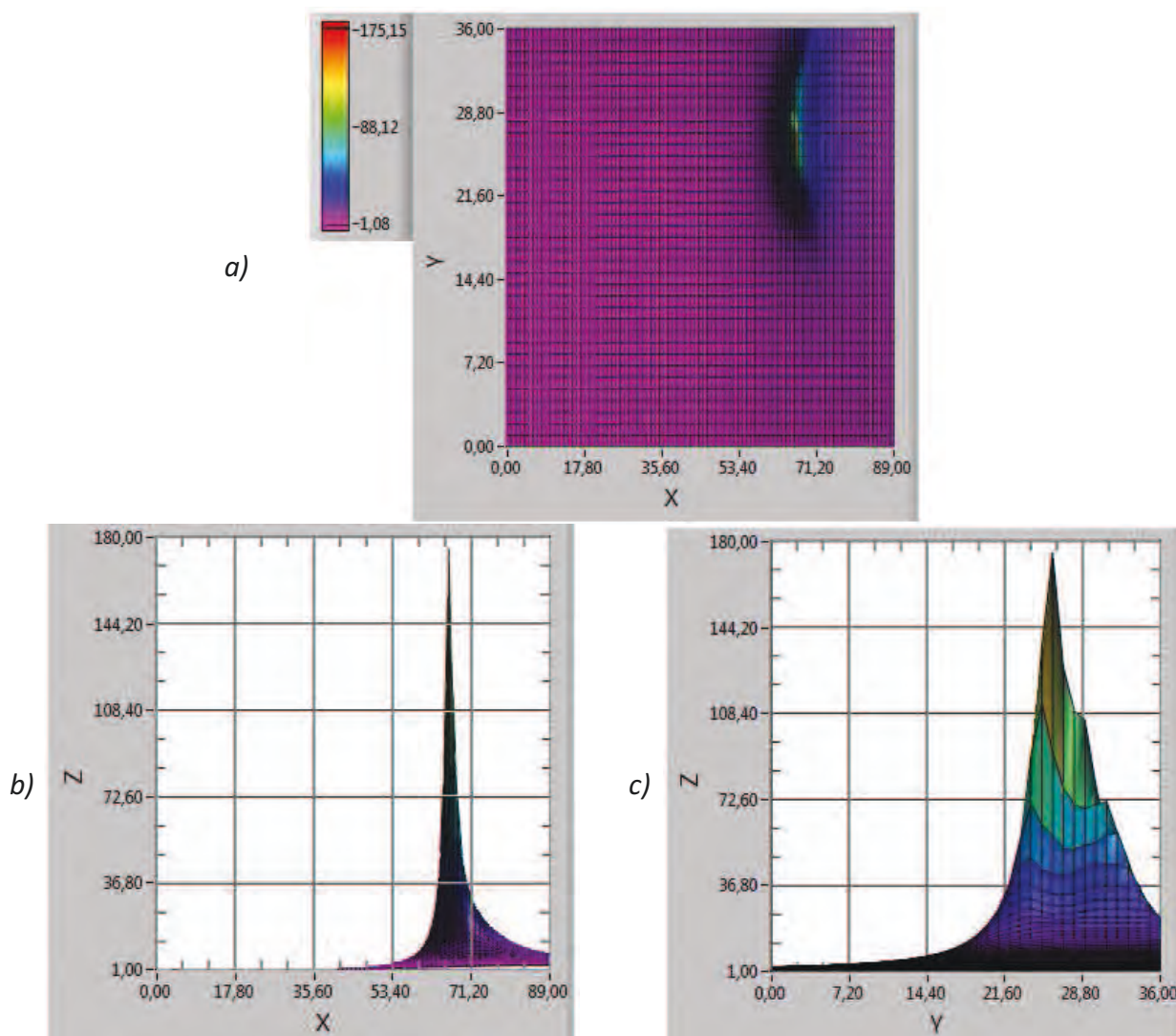


Figura 5.10. Localización de AEs basada en la matriz de desviación de tiempos. Representación del gradiente de la solución: a) gráfico 2D con valor constante de la coordenada, b) proyección XZ y c) proyección YZ.

En la Figura 5.10 el eje  $X$  es la coordenada  $x$ , el eje  $Y$  es la coordenada  $z$  y el eje  $Z$  es el valor de la matriz  $M'$ . En ella se refleja como los valores crecen a medida que se acercan a la solución (el máximo).

#### 5.2.4. Propagación de errores de los tiempos de llegada al algoritmo de localización

En este apartado se evalúa la sensibilidad del algoritmo a errores en los TDOAs. Para ello se introducen retardos en los TDOAs:  $1\%$  del rango completo ( $3 \mu s$ ) y  $10\%$  del rango completo ( $30 \mu s$ ). El error límite se calcula como sigue:

$$Error = |E_x| + |E_y| + |E_z| = |X_{AES} - X_{SOL}| + |Y_{AES} - Y_{SOL}| + |Z_{AES} - Z_{SOL}|, [cm] \quad (57)$$

donde  $X_{AES}$ ,  $Y_{AES}$  y  $Z_{AES}$  son las coordenadas reales de la AES y  $X_{SOL}$ ,  $Y_{SOL}$  y  $Z_{SOL}$  con las coordenadas de la solución del algoritmo.

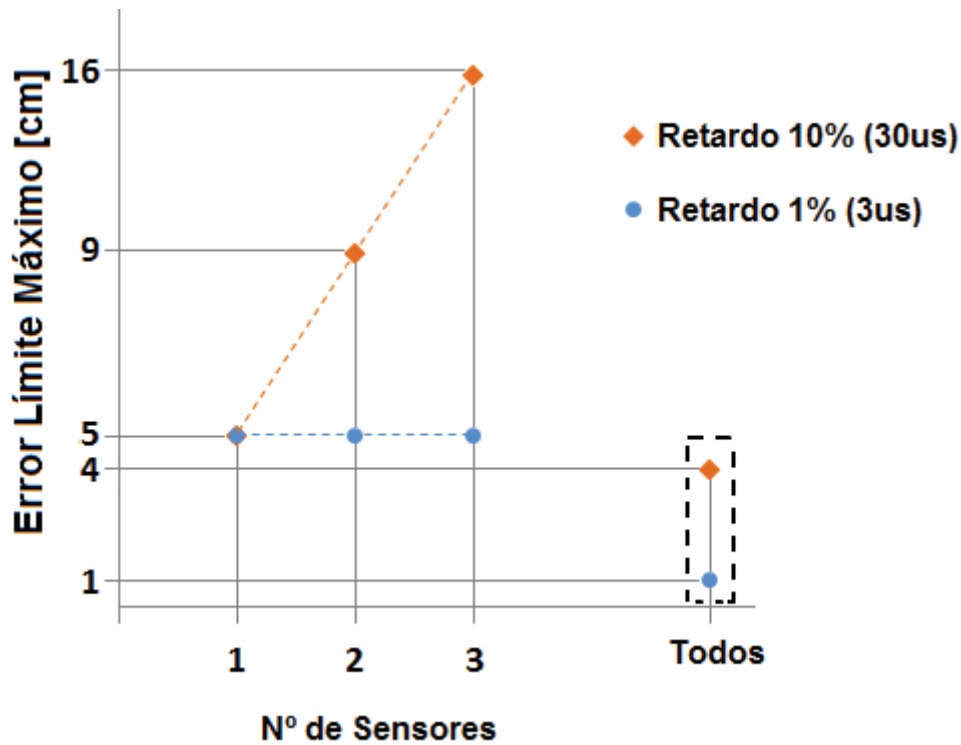


Figura 5.11. Representación del error límite máximo para un retardo del 1% y el 10% en uno o más sensores.

Cuando el retardo (1% y 10%) se le introduce a todos los sensores excepto los más cercanos a la fuente, el error es menor que 1 cm. Cuando los sensores afectados son los más cercanos (caso representado en la Figura 5.11), el error límite se mantiene constante con el retardo del 1% y se incrementa con el retardo del 10% en función del número de sensores involucrados. En el caso particular de un error sistemático en todos los sensores (desviación del tiempo cero), la influencia en la solución del algoritmo es más pequeña como se refleja también en la figura.

### 5.2.5. Influencia del número de sensores y sus posiciones

En este caso, se evalúa la influencia del número de sensores y las posiciones de los mismos en el resultado del algoritmo. Con este propósito, se analiza la respuesta del algoritmo cuando se eliminan uno o más sensores PZT (hasta tres).

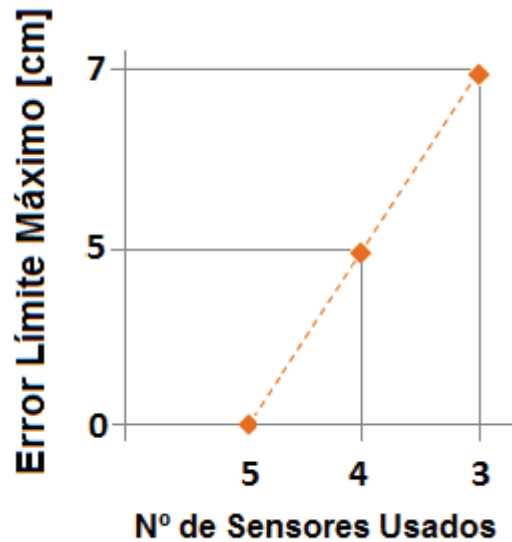


Figura 5.12. Representación del error límite máximo cuando se eliminan uno o más sensores.

Si no se eliminan los sensores más cercanos a la AES, el resultado del algoritmo no se ve afectado. Si los sensores eliminados son los más cercanos, el error límite máximo es el representado en la Figura 5.12. En ningún caso, el error supera los 7 cm.

### 5.2.6. Conclusiones

En este apartado se ha presentado un sistema de instrumentación multicanal para la detección y localización de AEs aplicado al caso de estudio de PDs en un transformador trifásico de alta tensión. El sistema presenta un enfoque de detección y localización todo-acústico basado en una referencia de tiempo dada por un sensor de OF instalado en el interior del tanque y los tiempos de llegada a varios sensores piezoeléctricos instalados en la cara exterior de las paredes del tanque (dos delante de las bobinas de cada fase de un transformador trifásico para una aplicación típica). El procesado de señal incluye técnicas digitales de denoising y algoritmos de localización basados en LUTs de TDOAs implementados con instrumentación virtual. En definitiva, se ha diseñado una herramienta completa que detecta y localiza AEs con una resolución de 1 cm.

Además, se ha realizado un análisis del error de propagación de los tiempos de llegada, así como de la influencia del número de sensores y sus posiciones en el algoritmo de localización 3D. Este análisis muestra que el error límite es menor que 1 cm cuando los sensores más cercanos a la fuente de emisión no están involucrados (no contienen errores – Figura 5.11– y no han sido eliminados – Figura 5.12 –).

## 5.3. Medidas en condiciones de corriente continua de alta tensión (HVDC)

Se ha desarrollado una configuración experimental que simula transformadores HVDC para demostrar la efectividad de los sensores acústicos, especialmente el sensor de OF, en la detección y localización de PDs bajo estas condiciones particulares. Se incluyen diferentes técnicas de detección de PDs: acústicos y eléctricos. Los sensores acústicos usados son el mencionado sensor de OF (apartado 4.1.2) y los sensores PZT estándar (apartado 4.1.1). El sensor de OF ha sido capaz de detectar PDs con mejor sensibilidad que los métodos eléctricos. El objetivo del trabajo es analizar el comportamiento del aislamiento eléctrico (aceite mineral / cartón prensado) en condiciones de HVDC, para ello se ha sometido el sistema de instrumentación multicanal a estos estímulos [5.5].

### 5.3.1. Sistema de instrumentación

El objetivo del estudio de PDs en condiciones de HVDC es analizar el comportamiento de los aislantes eléctricos (aceite mineral / cartón prensado) ante estos estímulos [5.6-5.9]. Para ello, se ha diseñado y construido una plataforma de pruebas.

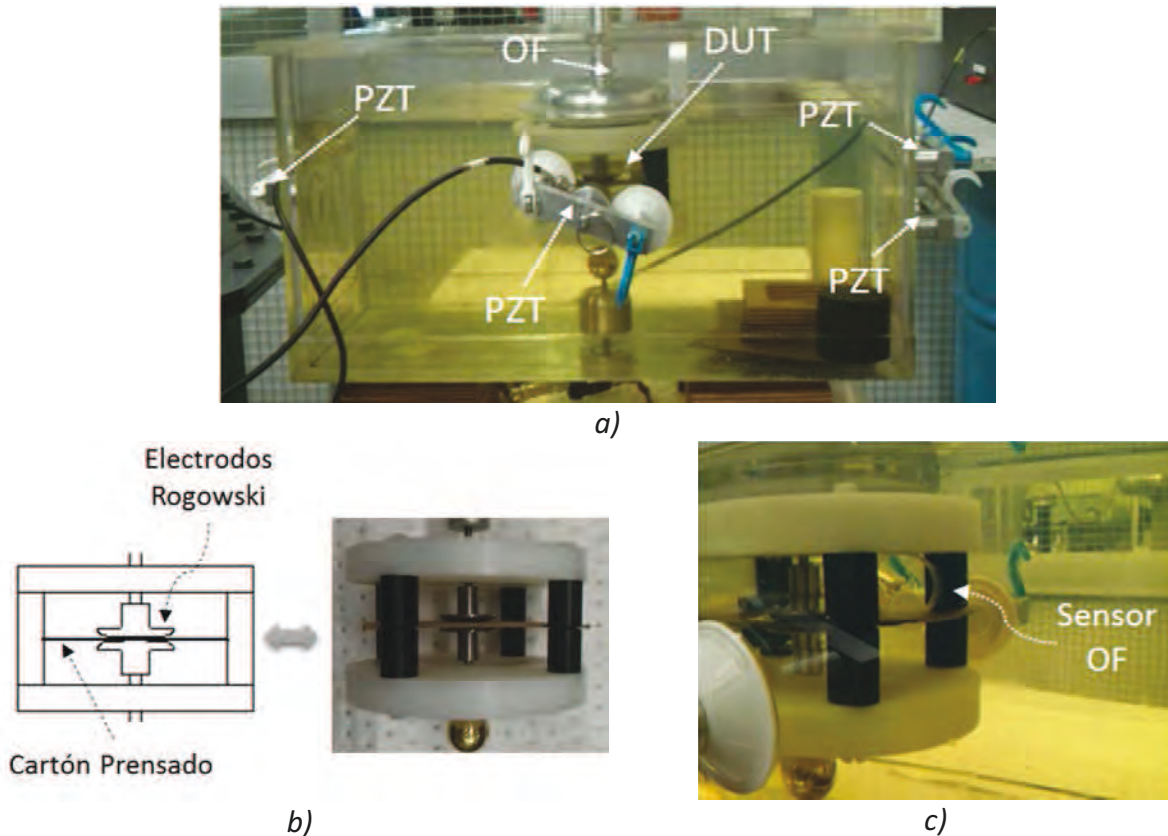


Figura 5.13. a) Plataforma para pruebas de PDs. b) Dispositivo bajo prueba (DUT). c) Localización del sensor de OF.

La Figura 5.13a) es una parte del experimento para pruebas de PDs que incluye el tanque, los sensores PZT en la cara externa de las paredes y el sensor de fibra y el DUT en el interior. El dispositivo bajo prueba (DUT-Device Under Test) posee una estructura de plano-cartón-plano como se muestra en la Figura 5.13b). Esta estructura va sumergida en un tanque cúbico de aceite mineral. Una de las ventajas de los sensores de OF es que van inmersos en el medio aislante cerca de la fuente, como se puede apreciar en la Figura 5.13c). Esto les permite recibir señales acústicas más intensas.

### 5.3.2. Configuración experimental

El esquema experimental de detección y localización de PDs incluye una parte acústica y una parte eléctrica. La primera de ellas está constituida por un sistema multicanal de medida y un set de sensores acústicos. El sistema multicanal posee un hardware de acondicionamiento y adquisición y un software de procesamiento (LabVIEW). En este caso, se han usado cuatro sensores ultrasónicos PZT (R15I-AST) fijados a las paredes y un sensor de OF en el interior del tanque. La parte eléctrica está formada por un sistema detector de PDs (TechImp) y un portátil con software de detección (PD Base II-TechImp).

La Figura 5.14 muestra el sistema completo para la generación de HVAC-DC y detección y localización de PDs. El esquema eléctrico de generación consta de un transformador de alta tensión mixto, fuente de alimentación de DC, un regulador de AC y el DUT. Este tipo de transformadores permite trabajar con AC, DC y AC+DC.

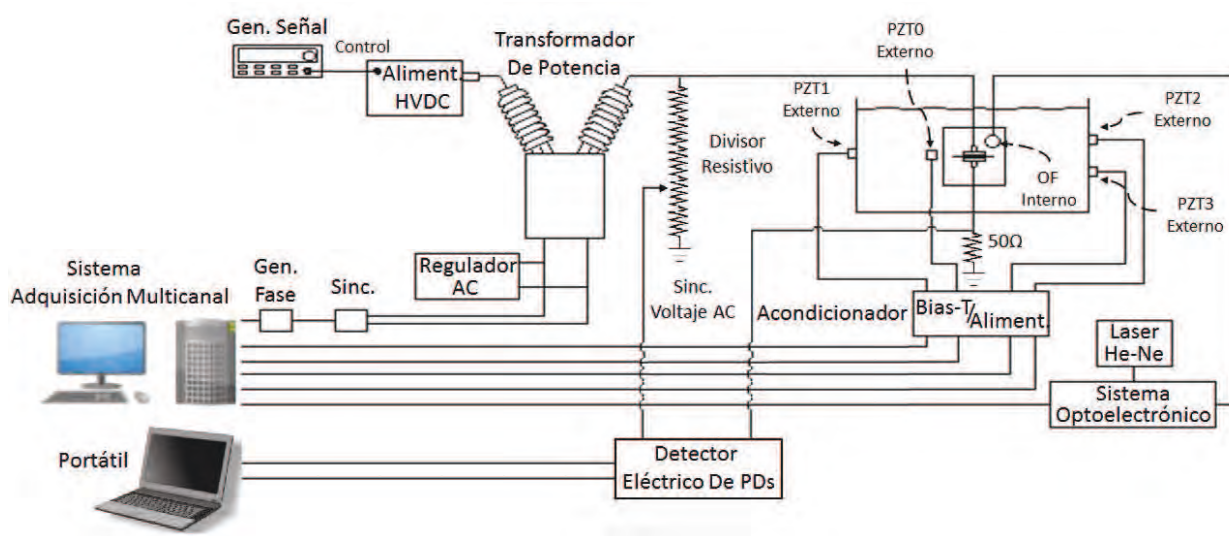


Figura 5.14. Esquema del sistema de ensayos en HVAC-DC para la generación y detección de PDs.



### 5.3.3. Medida de descargas parciales en HVAC

En esta fase de la investigación, el objetivo es trabajar en HVDC. Sin embargo, se ha realizado previamente un estudio de detección e identificación acústica de PDs en HVAC, tomando ventaja de la configuración mixta (Figura 5.14). Para ello, se implementó un patrón PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) acústico. La implementación del patrón se describe en el apartado 4.2.3.

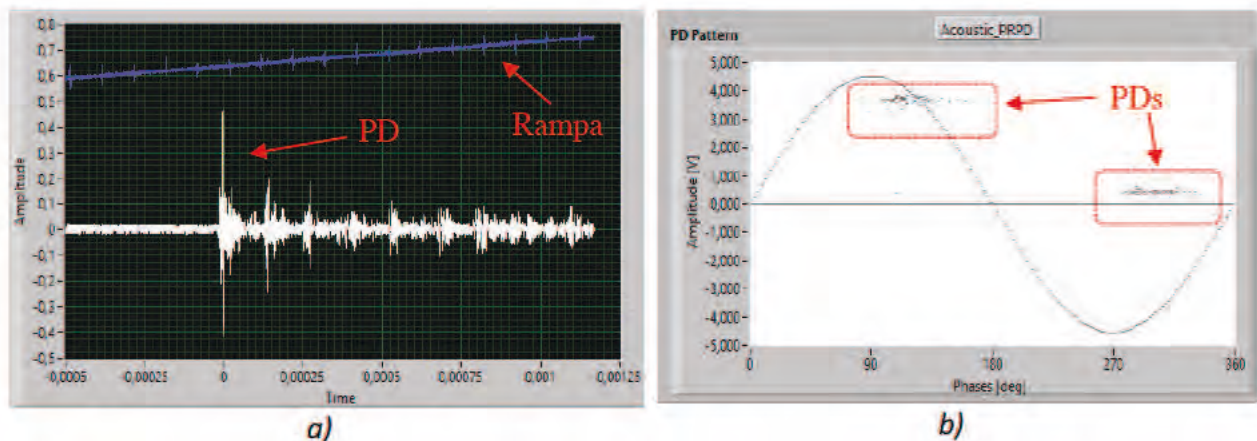


Figura 5.15. Gráfico de adquisición de PDs a) y representación patrón PRPD acústico b).

El resultado (Figura 5.15) es una representación acústica de PDs con respecto a la fase de red que proporciona información sobre el tipo de descarga. Este tipo de patrón hasta ahora era exclusivo de la detección eléctrica de PDs.

Los test en condiciones de HVAC se realizaron con instrumentación eléctrica y acústica en paralelo, lo que permitió validar el patrón PRPD acústico con el eléctrico. Ambos sistemas detectaron el mismo tipo de PDs y todo parece indicar que se encuentran localizadas en el aceite ya que en AC es en el aceite donde se concentra el estrés dieléctrico.

### 5.3.4. Medida de descargas parciales en HVDC

En este apartado se llevan a cabo medidas de PDs en condiciones de HVDC usando el esquema experimental de la Figura 5.14. El voltaje de inicio de PDs es fuertemente dependiente de la humedad del aceite y del nivel de impregnación del cartón en aceite. Por esta razón, el cartón sumergido en aceite mineral ha sido sometido previamente a un proceso de extracción de aire y agua mediante vacío. También es importante destacar que la presencia del sensor de OF junto al DUT no modifica el voltaje de inicio de PDs.

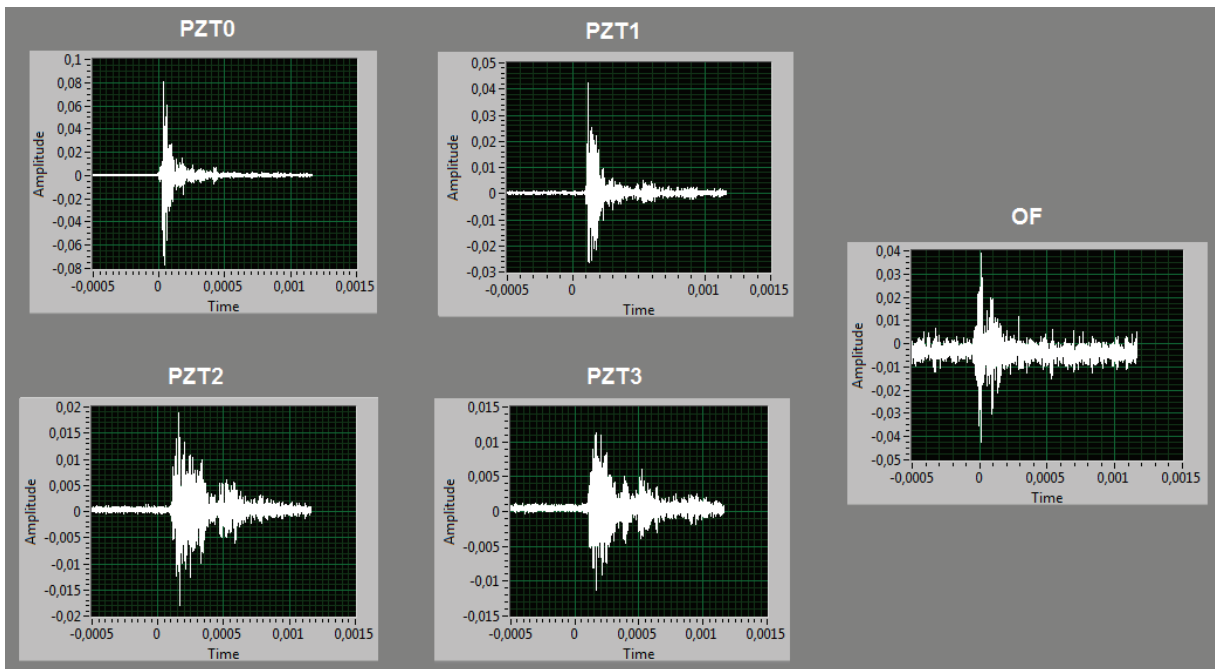


Figura 5.16. Resultados de la medida de PDs en condiciones de HVDC. [Tiempo en s, Amplitud en V]

Se ha realizado un estudio comparativo de las diferentes técnicas de detección de PDs (eléctricas y acústicas), analizando las señales registradas por cada sensor a medida que el voltaje DC iba aumentando.

El sensor de OF detecta señales acústicas de PDs a partir de  $2 Pa$  ( $9 mVp$ ). La Figura 5.16 muestra un detalle de los resultados obtenidos en las medidas de PDs donde el sensor de OF detectó  $9 Pa$  ( $40 mVp$ ). La respuesta del sensor de OF no ha sido tan buena, como la esperada, comparándola con la de los sensores PZT, sin embargo fue capaz de detectar PDs donde el método eléctrico no pudo. Las primeras descargas no aparecieron hasta los  $25 kV_{DC}$  debido al buen nivel de aislamiento.

Se aplicó el algoritmo de localización caracterizado en el apartado 5.2 a las descargas detectadas por los sensores acústicos, sólo a las detectadas por ambos tipos (OF y PZT). Tomando como sensor referencia de tiempos el sensor de OF, que es el más cercano.

La Figura 5.17 muestra la representación 3D de las soluciones del algoritmo. Los círculos azules representan las soluciones y los cubos naranjas representan los sensores. Por la ubicación de las descargas todo parece indicar que estas se producen en el cartón. Este es un resultado esperado ya que en DC el estrés dieléctrico se concentra más en el cartón, al contrario que en AC que se concentra en el aceite.

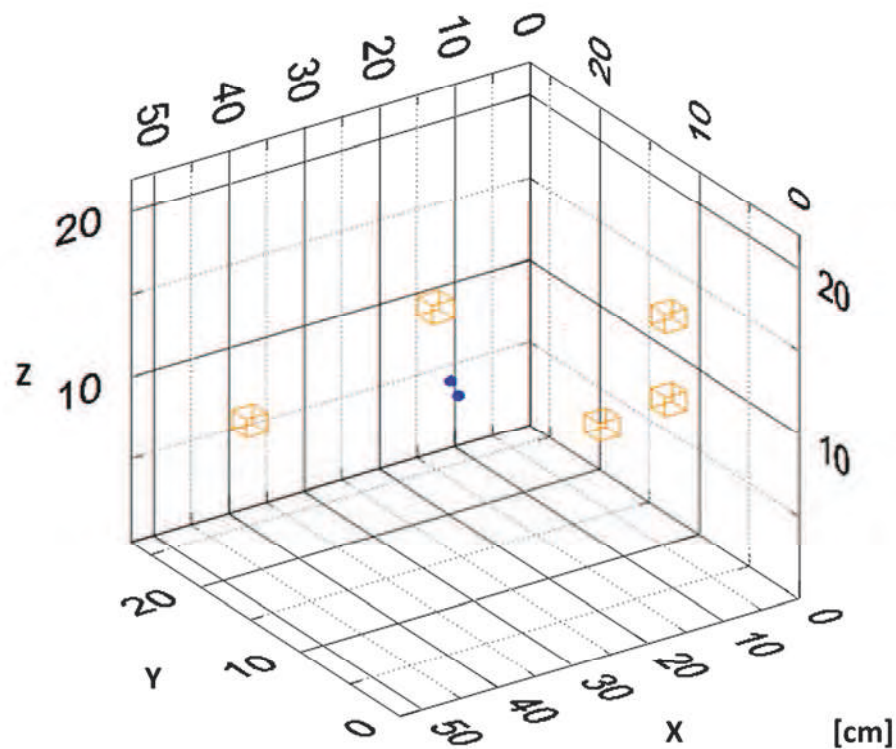


Figura 5.17. Resultados de localización de PDs (HVDC).

En este caso, debido a las condiciones del experimento, tamaño de cuba reducido y fabricada en PMMA, los sensores PZT han sido más sensibles detectando un mayor número de descargas que el sensor de OF. El resultado hubiese sido diferente en un transformador real con un tanque metálico y de mayores dimensiones.

### 5.3.5. Conclusiones

En este apartado se ha presentado el desarrollo un sistema completo de detección y localización de PDs en transformadores de HVDC, el cual integra diferentes técnicas de detección de PDs, eléctricas y acústicas, y es capaz de monitorizar las señales captadas por varios sensores al mismo tiempo. Resulta importante destacar que también fue integrado un sensor de OF en los experimentos de HVDC, comparándolo con otros métodos de detección y con otros sensores acústicos.

El análisis de las señales registradas de PDs muestra que el sensor de OF proporciona información sobre el tipo y la localización de la PD, no sólo como consecuencia de que soporta adecuadamente el entorno agresivo, sino también porque es capaz de detectar PDs en las particulares condiciones de HVDC.

## 5.4. Caracterización de la arquitectura de localización 2

En este apartado se presenta un sistema de programación híbrido para detección y localización de AEs (Arquitectura 2 - apartado 4.3.2). La primera etapa del sistema híbrido ha sido programada en LabVIEW y está dedicada a la detección. La segunda etapa ha sido programada en Matlab y está dedicada a la localización. Ambas etapas se comunican a través del conjunto de protocolos de red para transferencia de datos TCP / IP, que también permiten un análisis remoto de datos. Este sistema combina las ventajas de LabVIEW para la adquisición multicanal y el denoising de señales, y las ventajas de Matlab para el procesamiento de datos. Adicionalmente, se analizan y se comparan diferentes estrategias de resolución de ecuaciones de localización.

### 5.4.1. Sistema de instrumentación

El sistema de instrumentación es similar al usado anteriormente en otros experimentos. Está constituido por una plataforma experimental y un sistema de adquisición multicanal como el mostrado en la Figura 5.18 [5.10-5.11]. La plataforma experimental consiste principalmente en un recipiente con forma cúbica, cuyas dimensiones efectivas son  $900\text{ mm} \times 550\text{ mm} \times 370\text{ mm}$ . Las paredes del recipiente son de PMMA (polimetilmetacrilato) y tienen un espesor de  $1.5\text{ cm}$ .

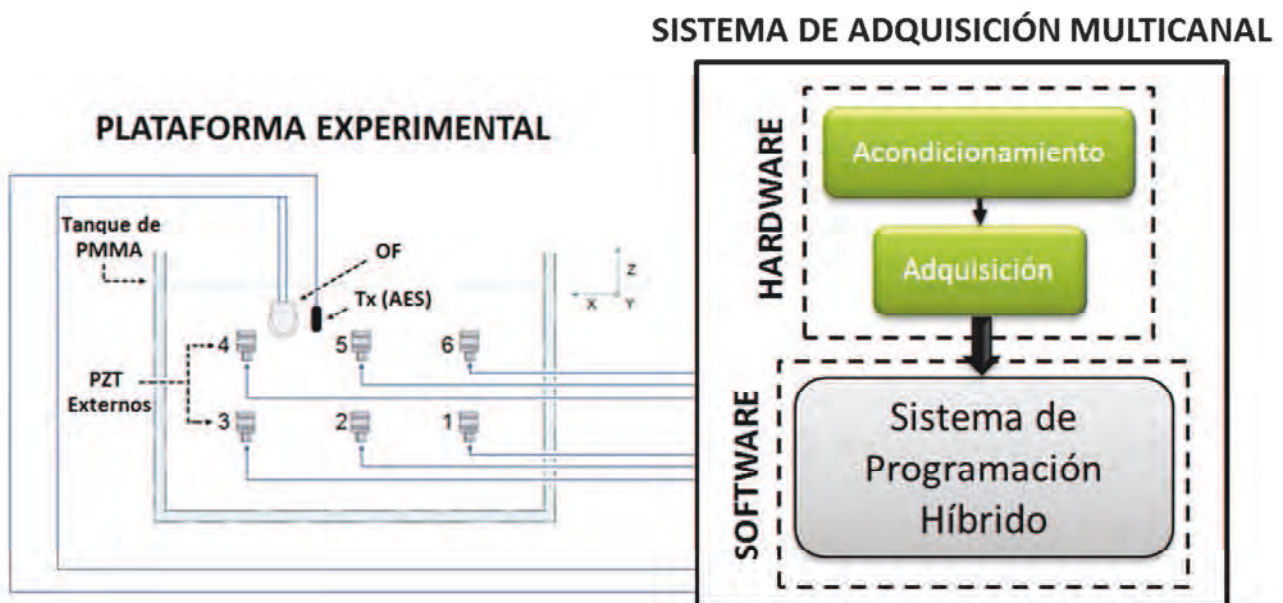


Figura 5.18. Esquema experimental para la detección y localización de AEs con un sistema de programación híbrido – LabVIEW/Matlab.

Como fuente de AEs se emplea un generador de ondas aplicado a un transductor ultrasónico PZT (B&K 8103/ Anexo I). Se han utilizado seis sensores PZT (R15I-AST) en las paredes y un sensor de OF en el interior del tanque [5.1].

El sistema de adquisición multicanal posee un hardware de acondicionamiento y adquisición (apartado 4.1.3), y un bloque software para detección y localización de señales acústicas (sistema de programación híbrido).

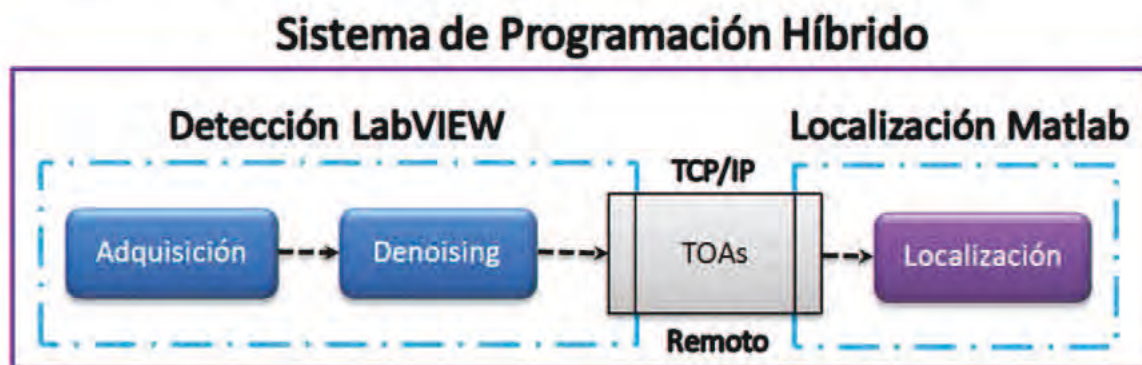


Figura 5.19. Sistema de programación híbrido para la detección y localización de AEs.

La Figura 5.19 muestra el diagrama de bloques del sistema de programación híbrido (Arquitectura 2) para la detección y localización de AEs.

### 5.4.2. Comparativa entre estrategias de resolución de ecuaciones de localización

El objetivo, en este caso, es poner a prueba el sistema híbrido. Para ello se analiza su comportamiento en condiciones reales de AEs y se compara la respuesta de diferentes estrategias de resolución de ecuaciones de localización. Las estrategias implementadas y probadas en este experimento han sido: Método Solve (función *solve* de Matlab), Método LS (apartado 3.3.4), Método LN (apartado 3.3.4), Método de Cramer (apartado 3.3.4), Método INI (apartado 3.3.4) y Método PSO (apartado 3.3.5).

En este caso, la posición de la AES es (580, 270, 260) y las posiciones de los sensores son las de la TABLA III. Este es un ejemplo de conjunto disperso de soluciones. La TABLA IV muestra el análisis estadístico de los TOAs. Como se puede apreciar la STD del sensor de referencia (S1) es de un 5%.

TABLA III. POSICIONES DE LOS SENSORES

Sensor	OF (S1)	PZT1 (S2)	PZT2 (S3)	PZT3 (S4)	PZT4 (S5)	PZT5 (S6)	PZT6 (S7)
Posición x,y,z (mm)	580,340,260	220,0,130	440,0,130	670,0,130	670,0,240	440,0,240	220,0,240

TABLA IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS TOAs POR SENSOR

Sensor	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Máx [ $\mu$ s]	65.3	325.2	334.5	226.0	211.5	221.5	316.0
Mín [ $\mu$ s]	49.3	325.2	334.3	225.8	204.8	221.3	315.5
Media [ $\mu$ s]	49.8	325.2	234.4	225.9	208.8	221.4	315.7
STD [ $\mu$ s]	2.483	0	0.079	0.064	3.273	0.084	0.128

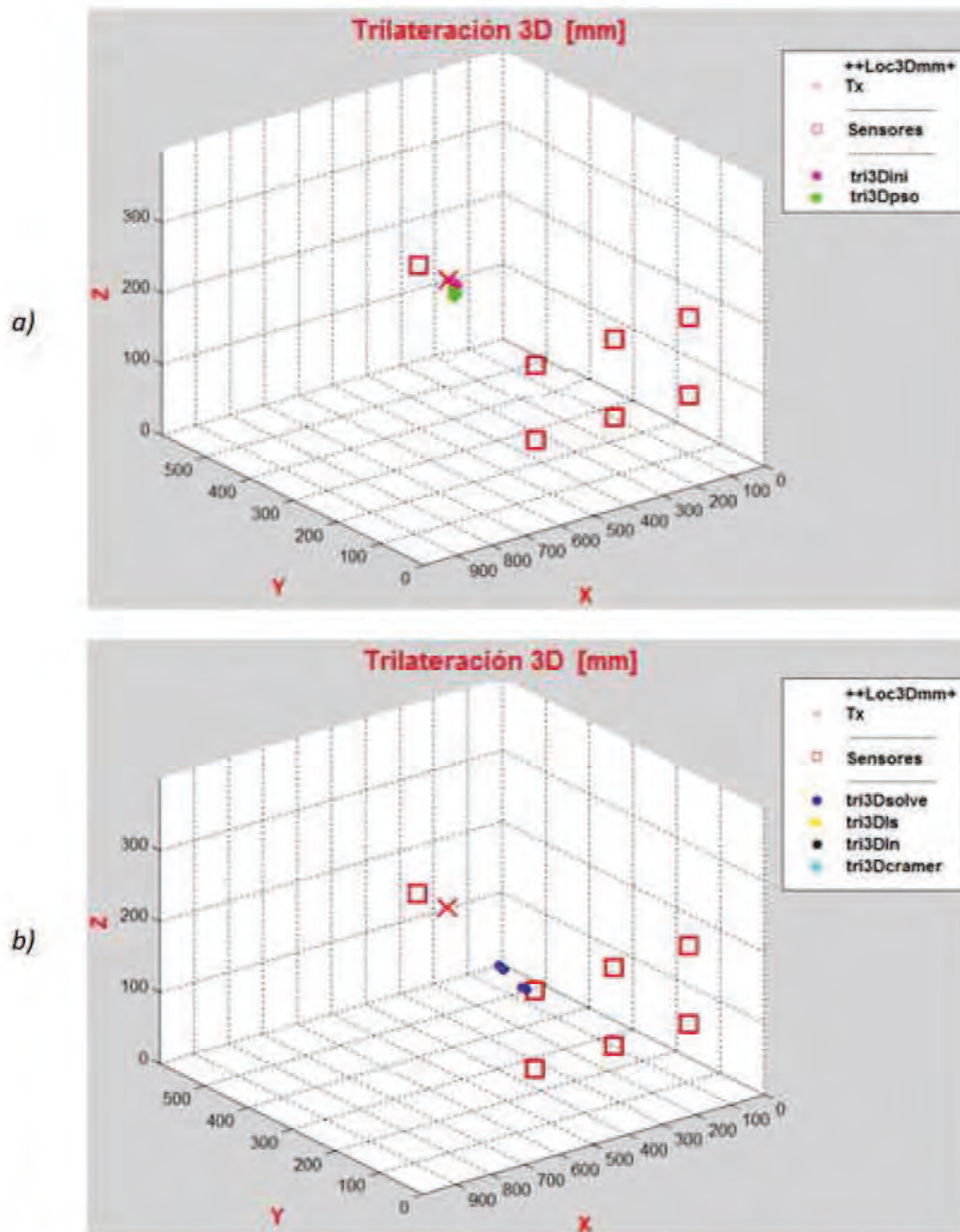


Figura 5.20. Resultados de localización de AES con soluciones dispersas [mm] (41 soluciones por método): a) INI y PSO; b) Solve, LS, LN y Cramer.

Los métodos INI y PSO proporcionan buenos resultados (Figura 5.20a)), sin embargo los métodos Solve, LS, LN y Cramer muestran una colección de soluciones dispersas alejadas de la localización correcta (Figura 5.20b)).

El error de offset se define como la distancia entre la posición real de la AES y el valor medio de las soluciones:

$$OffsetError = \sqrt{(x_R - x_M)^2 + (y_R - y_M)^2 + (z_R - z_M)^2} \quad (58)$$

donde  $(x_R, y_R, z_R)$  son las coordenadas de la posición real de la AES y  $(x_M, y_M, z_M)$  son el valor medio de las soluciones.

La dispersión de las soluciones está representada como la STD ( $\sigma$ ) de las soluciones:

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2, \quad \sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (59)$$

donde  $\sigma_x, \sigma_y$  y  $\sigma_z$  son las STDs de cada coordenada.

Los resultados de dispersión y errores de offset son los mostrados en la TABLA V.

*TABLA V. ERRORES DE LOCALIZACIÓN*

Método	Solve, LS, LN, Cramer	INI	PSO
Dispersión (cm)	3.2	1.4	0.7
Error de Offset (cm)	15.3	1.0	1.7

La TABLA VI muestra los tiempos de cómputo de cada una de las diferentes estrategias de localización. Todas ellas emplean el mismo tiempo excepto Solve y PSO que son más lentas. Aunque PSO depende del número de iteraciones fijadas.

*TABLA VI. TIEMPOS DE CÓMPUTO*

Método	Solve	LS	LN	Cramer	INI	PSO
Tiempo (ms)	163.7	83.1	83.5	83.3	83.7	163.2

### 5.4.3. Análisis de la propagación de errores en el proceso de localización

Se ha realizado una simulación (Matlab) con el fin de evaluar la influencia que un error en los TOAs tiene sobre la precisión en la localización. Para ello, por un lado se realiza un barrido del tanque, moviendo la AES a lo largo de los ejes XYZ como muestra la Figura 5.21. Y por otro, se añaden diferentes porcentajes de error a los TOAs.

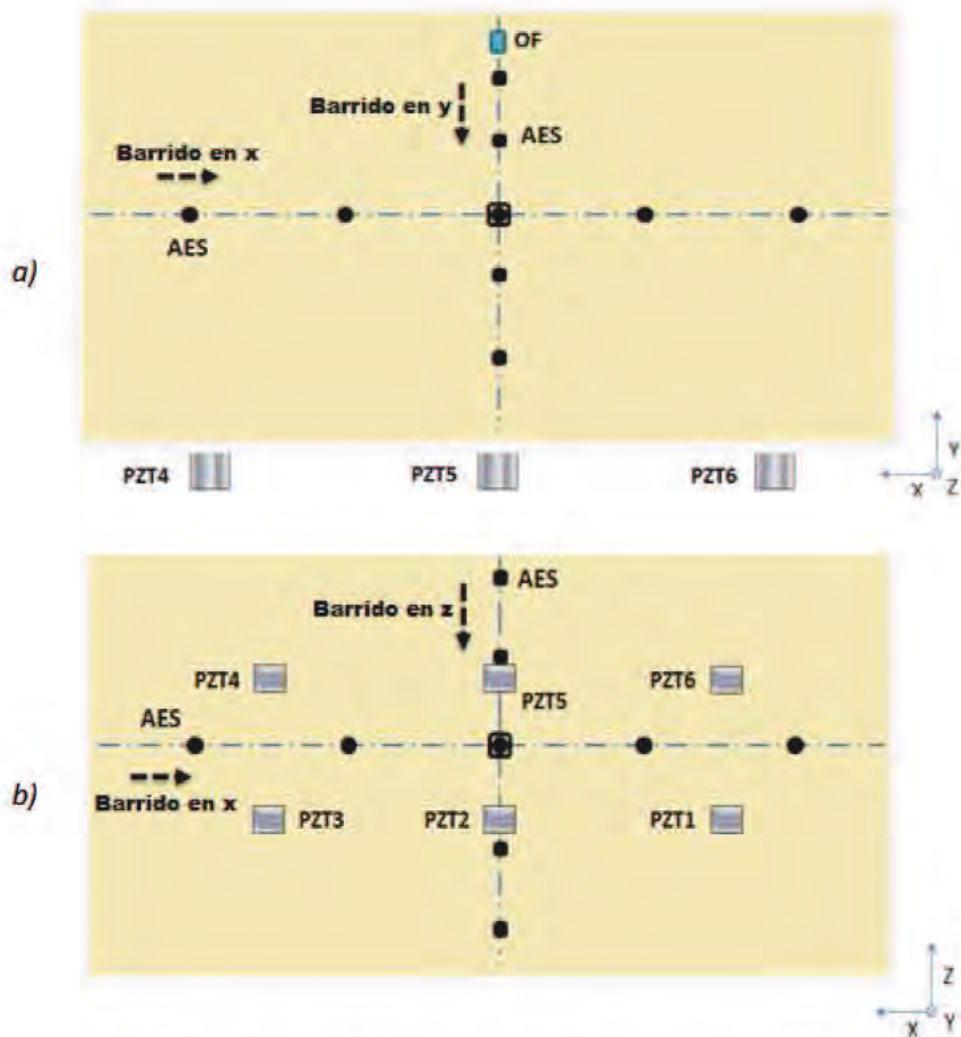


Figura 5.21. Barrido del tanque a) Eje XY (planta) y b) Eje XZ (alzado).

A continuación se mostrarán los resultados del método PSO, considerando que es el método que obtuvo la mejor respuesta en la comparación anterior. Se han tomado 100 muestras para cada una de las posiciones de la AES.

En primer lugar, se aplica un error aleatorio de hasta un 2% (distribución uniforme – media = 1%) a cada TOA. Los resultados se muestran en la Figura 5.22. En la figura, se representan la solución media para cada coordenada, el error de offset, la dispersión y los porcentajes de cada uno de los errores. Estos porcentajes están referidos a la distancia máxima posible entre dos puntos dentro de la cuba, que es la diagonal:

$$\%Error = \frac{Error}{D_{Cuba}} \cdot 100 \quad (60)$$

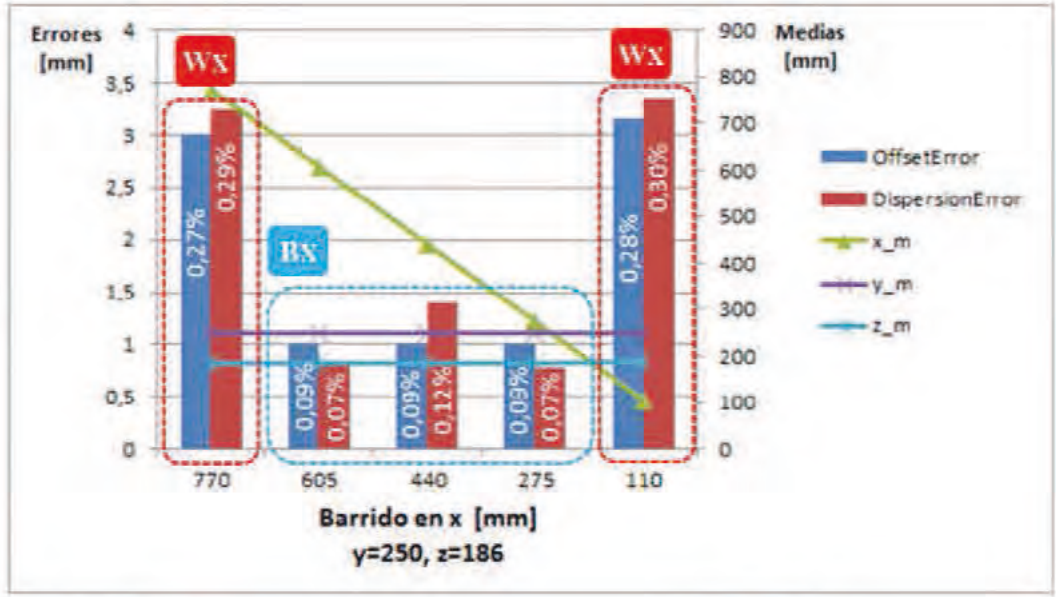
donde  $D_{Cuba}$  es la diagonal:

$$D_{Cuba} = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = 1117,766 \text{ mm} \quad (61)$$

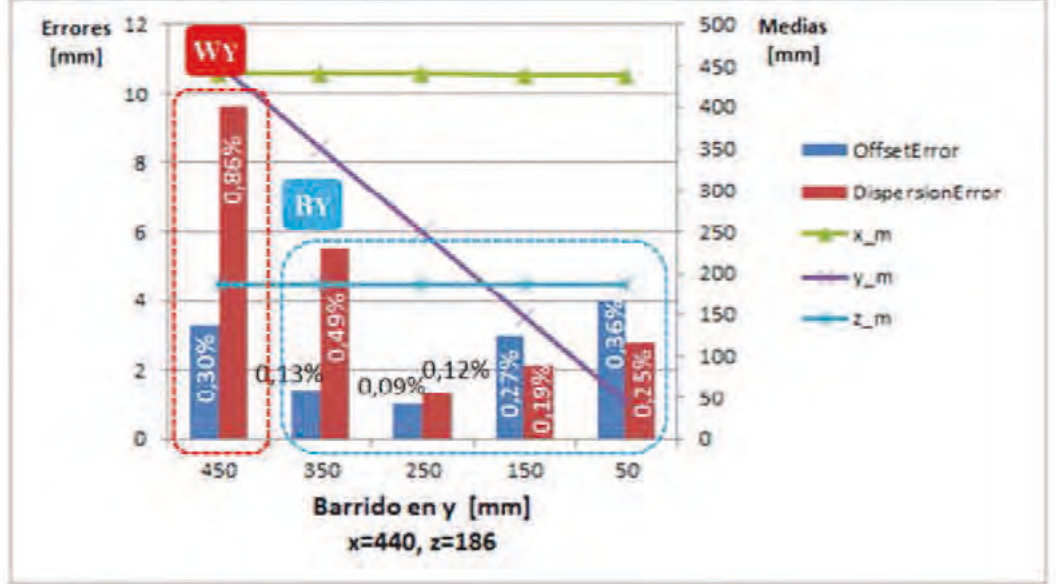
donde  $(dx, dy, dz) = (900, 550, 370) \text{ mm}$  son las dimensiones de la cuba.



a)



b)



c)

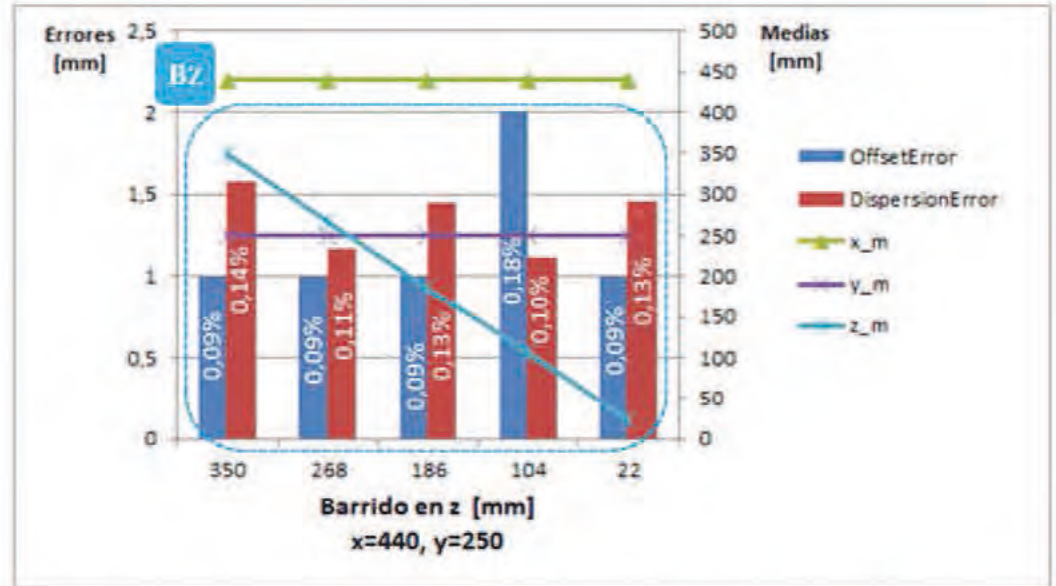


Figura 5.22. Resultados (2%) del barrido en X en a), del barrido en Y en b) y del barrido en Z en c).

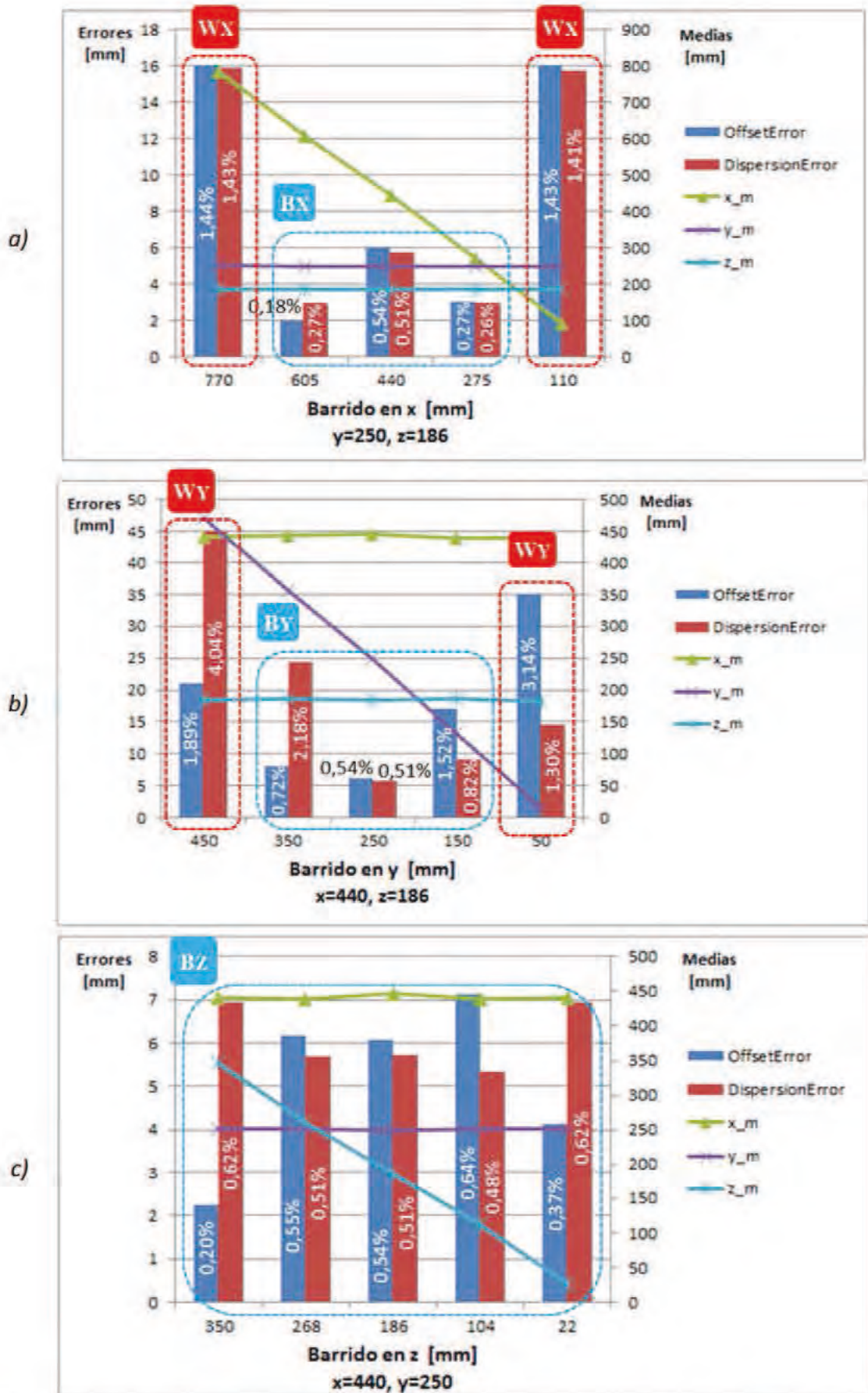


Figura 5.23. Resultados (10%) del barrido en X en a), del barrido en Y en b) y del barrido en Z en c).

Los resultados de la figura 5.22 muestran diferentes zonas dependientes del eje. Las áreas  $Bk$  son zonas más acotadas y estables y las áreas  $Wk$  son zonas fronterizas que presentan errores mayores. Se observan efectos de borde y profundidad en las zonas  $Wx$  y  $Wy$ , respectivamente. En este caso, el error máximo de dispersión es  $9,5\text{ mm}$  y el error máximo de offset es  $4\text{ mm}$  (menos del  $1\%$  en ambos casos).

Y en segundo lugar, se aplica una fuente de error más intensa (hasta un  $10\%$  – distribución uniforme –  $media = 5\%$ ). Los resultados son los de la Figura 5.23.

Los resultados son similares al caso anterior, excepto en la escala. Los resultados del  $10\%$  siguen el mismo patrón que el  $2\%$  con un factor de aproximadamente 5. Sin embargo, en el segundo caso, el efecto de proximidad a los sensores PZT es más pronunciado (área  $Wy$ ). El error máximo de dispersión es  $4,5\text{ cm}$  y el error máximo de offset es  $3,5\text{ cm}$  (menos del  $5\%$  en ambos casos).

#### **5.4.4. Conclusiones**

En este apartado se ha mostrado el sistema de programación híbrido de dos etapas para la detección y localización de AEs. Este sistema combina las ventajas de LabVIEW para la adquisición multicanal y el denoising de señales y las ventajas de Matlab para el procesamiento y la presentación de datos. Ambos módulos se conectan mediante protocolo TCP/IP, lo que facilita plantear una operación de forma remota.

Se han aplicado y comparado experimentalmente diferentes estrategias de resolución de ecuaciones de localización con una resolución de  $1\text{ mm}$ . Los métodos INI y PSO son los que proporcionan mejores resultados (valorando la relación precisión frente a tiempo de cómputo).

Adicionalmente, se ha realizado un estudio de propagación de errores de los TOAs a los resultados de localización; para ello se aplicaron diferentes magnitudes de error y en diferentes posiciones de la fuente. En el análisis de resultados se identifican claramente los efectos de borde, profundidad y proximidad. Aun así, los máximos errores relativos de localización (offset y dispersión) son menores que los errores medios relativos de los TOAs, obteniendo precisión de  $1\text{ cm}$  con una distribución uniforme de error ( $0\% - 2\%$ ) en los TOAs.



# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

En este último capítulo se extraen las principales conclusiones del trabajo de investigación, se destacan las principales contribuciones y se proponen posibles trabajos futuros derivados del mismo. Adicionalmente, se enumeran las publicaciones asociadas a esta investigación.

### 6.1. Conclusiones

Esta tesis presenta la investigación y el desarrollo de un nuevo sistema de instrumentación multicanal para la localización todo-acústica de AEs generadas por PDs sobre la base de la detección de ultrasonidos con sensores de OF internos y sensores PZT externos. Está enfocado en la implementación de la adquisición, la detección y la reducción de ruido en AEs y en el análisis de diferentes estrategias de localización de la AES. Para ello se proponen dos alternativas, que son implementadas mediante diferentes arquitecturas y caracterizadas experimentalmente en pruebas de AEs. Adicionalmente, se demostró el funcionamiento del sistema con señales reales de PDs en condiciones de HVAC-DC, las cuales están en la vanguardia en este campo de investigación. Este capítulo resume los principales logros y conclusiones de este trabajo de investigación.

La primera parte se centra en adquisición, denoising y detección (TOA) de AEs de PDs. Se desarrolló un sistema completo de adquisición para monitorizar señales procedentes de varios

sensores acústicos al mismo tiempo. Se propone una secuencia de procesamiento de señal que permite reducir el umbral de detección un orden de magnitud y mejorar la precisión en la determinación de los TOAs y, como consecuencia, la localización de la AES. Se presentan las técnicas de denoising de PDs adaptadas a la medida acústica y probadas con señales acústicas. Las técnicas wavelet y el filtrado paso-banda digital (WT + BPF) resultan las de mayor utilidad. Adicionalmente, se incluye una primera aproximación de localización espacial de AES (mallado 3D con el refinamiento progresivo). En resumen, se ha diseñado una herramienta completa que detecta y localiza AEs generadas por PDs con una resolución de  $1\text{ cm}$ . El análisis estadístico de los TOAs muestra que el sistema de denoising obtiene una mejora significativa en ambientes ruidosos con señales débiles, mejorando el umbral de detección y la precisión en la determinación de los TOAs.

Con el fin de centrarse en una aplicación real, se ha presentado un sistema de instrumentación multicanal para la localización de PDs en transformadores de potencia. Se basa en la detección de AEs de PDs en aceite con sensores PZT y de OF. Se ha propuesto un enfoque de detección y localización todo-acústico basado en una referencia de tiempos (el sensor de OF) ubicada en el interior del tanque y varios sensores PZT instalados en el exterior (dos por fase en un transformador trifásico como aplicación típica). El procesado de señal incluye técnicas digitales de denoising y algoritmos de localización basados en LUTs de diferencias de tiempos, todo ello implementado con instrumentación virtual (arquitectura simple – LabVIEW). El algoritmo basado en LUTs mejora la ratio de rendimiento frente a costes computacional y de complejidad en comparación con el diseño previo de mallado 3D con refinamiento progresivo. En este caso, al igual que en el caso anterior, se dispone una herramienta completa que detecta y localiza AEs generadas por PDs con una resolución de  $1\text{ cm}$ . También se realizó un análisis de la propagación de errores desde la medida de los TOAs hasta la precisión en la localización, así como de la influencia del número de sensores y sus emplazamientos en el algoritmo de localización 3D. Este análisis muestra que el error límite es inferior a  $1\text{ cm}$ , cuando los sensores que están más cerca de la AES no están afectados.

El siguiente paso fue demostrar el funcionamiento del sistema con señales reales de PDs. Para ello se desarrolló un sistema completo de detección y localización de PDs en transformadores de HVAC-DC, el cual integra diferentes técnicas de detección de PDs, eléctrica y acústica, y es capaz de monitorizar las señales recibidas por varios tipos de sensores al mismo tiempo. Es importante mencionar que se integra un sensor de OF en experimentos de HVAC-DC, así como que se compara con otros métodos de detección. El análisis de las señales de PDs

registradas muestra que el sensor de OF proporciona información que ayuda a la evaluación del tipo y la localización de la PD, no sólo por su capacidad para funcionar en condiciones extremas de alta tensión, sino porque es capaz de medir en la situación particular de HVDC, donde otros sensores y técnicas de medida de PDs tienen dificultad para hacerlo.

Con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema completo, finalmente se propone un sistema de programación híbrido para la detección y localización de AES. Este sistema de arquitectura híbrida combina las ventajas de la VI para la adquisición multicanal, el denoising y la detección de señales y determinación de TOAs, junto con las de la programación matricial para el procesamiento y representación de datos. Ambos módulos se conectan entre sí a través de TCP / IP, facilitando además con ello una operación remota del sistema de monitorización. En este caso, se han podido comparar diferentes estrategias de resolución de ecuaciones de localización con una resolución de  $1\text{ mm}$ . Se demuestra que las estrategias de localización PSO e INI son las más eficientes. Adicionalmente, el análisis de la propagación de errores de los TOAs a los resultados de localización arroja las siguientes conclusiones: se identifican claramente los efectos de borde, de profundidad y de proximidad en la localización; aun así los errores por offset y dispersión de resultados de localización son menores en términos relativos que los proporcionados por los TOAs. Con ello, se obtiene una precisión en la localización mejor que  $1\text{ cm}$  en  $1\text{ m}$  con una distribución uniforme de error ( $0\% - 2\%$ ) en los TOAs.

A continuación se resumen las principales aportaciones de este trabajo de investigación:

- El diseño e implementación de un sistema de instrumentación multicanal para la detección y localización de AEs procedentes de PDs combinando sensores PZT y sensores de OF en un enfoque todo-acústico.
- La mejora de la detección y localización de AEs con la secuencia propuesta de denoising (wavelet y filtrado digital).
- La implementación y caracterización de un sistema para la detección y localización de AES con una resolución de  $1\text{ cm}$  utilizando una arquitectura simple de programación (LabVIEW).
- La implementación y caracterización de un sistema para la detección y localización de AES con una resolución de  $1\text{ mm}$  utilizando una arquitectura de programación híbrida (LabVIEW - Matlab).
- La validación del sistema en condiciones reales de PDs en experimentos HVAC-DC.

## 6.2. Trabajo futuro

Algunas cuestiones relacionadas con las propuestas presentadas en esta tesis se pueden trasladar a trabajos futuros. A continuación se presenta una selección de las mismas:

- La instalación del sistema de instrumentación para la monitorización de transformadores de potencia en-línea a largo plazo. Se propone un enfoque con sensores externos para la caracterización del sistema de medida con transformadores en servicio y para la validación de medidas acústicas de PDs en campo. Además, se propone instalar al menos un sensor de OF dentro del transformador durante el proceso de fabricación. De este modo, se pueden incorporar test de AE con sensores PZT y de OF en el conjunto de pruebas de fabricación.
- La integración de diferentes técnicas de detección de PDs (eléctrica, UHF, acústica y con sensores de OF) en el mismo sistema con el fin de aprovechar las virtudes complementarias de cada uno de ellos. Por ejemplo, las mediciones eléctricas proporcionan los medios para la identificación del tipo de PD y del tipo de fallo en sistemas HVAC, AE y UHF son métodos no convencionales de medida de PDs que se están volviendo cada vez más comunes en la localización de PDs y los sensores de OF resultan muy prometedores en el ámbito la monitorización continua.
- El estudio de arquitecturas de adquisición para el procesamiento en-línea y la integración de hardware específico de procesado (FPGA / DSP) para aumentar la velocidad de cómputo. Una primera aproximación implementa la adquisición y denoising de cada canal y la gestión de estas tareas para todos los canales en paralelo. Adicionalmente, podría explorarse la correlación cruzada entre las señales procedentes de la AES y diversos canales de medida para permitir la integración de estrategias de localización en el procesamiento hardware o la mejora de la capacidad de detección. En este caso, el manejo de la alta frecuencia de las señales de ultrasonidos supone un desafío.



## 6.3. Listado de publicaciones

### Cuerpo de la tesis

#### Revistas

- I. **Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano and J. A. García-Souto. “Instrumentation System for the Location of Partial Discharges using Acoustic Detection with Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 63, No. 5, pp. 1002-1013, May 2014.
- I. **Búa-Núñez**, J. E. Posada-Roman and J. A. García-Souto. “Multichannel Detection of Acoustic Emissions and Localization of the Source by using a Hybrid Programming System”. ISA Transactions, Submitted 2015.

#### Volúmenes SPIE

- I. **Búa-Núñez**, C. G. Azcárraga-Ramos, J. E. Posada-Román and J. A. García-Souto, “Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments”, SPIE Proceedings, Vol. 9157, June 2014.

#### Comunicaciones a Congresos IEEE

- I. **Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano and J. A. García-Souto, “Multichannel Acquisition System and Denoising for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 1135-1140.
- I. **Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román and J. A. García-Souto, “Two-Stage Processing System for the Detection and On-Site Localization of Acoustic Emissions”, 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC15), May 2015, pp. 1921-1926.

## **Comunicaciones a congresos nacionales**

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Sistema de Instrumentación Multicanal para la Detección y Localización de Descargas Parciales por medio de Emisiones Acústicas con Procesado y Técnicas de Reducción de Ruido”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2012, July 2012.

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Sistema Multicanal de Medida de Emisiones Acústicas de Ultrasonidos para Transformadores Trifásicos”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2013, July 2013.

## **Otras relacionadas con la tesis**

### **Comunicaciones a congresos IEEE**

J. E. Posada-Román, J. A. García-Souto, J. Rubio-Serrano and **I. Búa-Núñez**, “Multichannel Ultrasound Instrumentation for On-line Monitoring of Power Transformers with Internal Fiber Optic Sensors”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 200-205.

J. Rubio-Serrano, J. E. Posada-Román, **I. Búa-Núñez** and J. A. García-Souto, “Comparison of processing techniques for optimizing the solid insulation diagnosis based on the detection of acoustic emissions from partial discharges”, 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD13), June 2013, pp. 129-132.

### **Comunicaciones a congresos nacionales**

J. E. Posada-Román, **I. Búa-Núñez**, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Detección de Emisiones Acústicas en Transformadores Trifásicos con Sensores Internos de Fibra Óptica”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2013, July 2013.

# Chapter 7

## Conclusions and future work

### 7.1. Conclusions

This dissertation presents the research and development on a new multichannel instrumentation system for the all-acoustic localization of AE from PD on the base of detecting the ultrasounds with both internal OF sensors and external PZT sensors. It is focused on implementing the acquisition, detection and denoising of AE signals and analyzing different strategies of localization of AES. For this purpose two alternatives are proposed, they were implemented by two different architectures and characterized experimentally in tests of AE. In addition, the system was demonstrated with PDs in HVAC-DC setups, which are state-of-the-art experiments in this research field. This chapter summarizes the major achievements and conclusions during the research.

First part is focused on acquisition, denoising and detection (TOAs) of AE signals from PD. A complete system of acquisition was implemented for monitoring signals received by several acoustic sensors of different types at the same time. A signal processing sequence allows reducing the detection threshold one order of magnitude and improving the precision for determining the TOAs and, consequently, the localization of the AES. The PD denoising

techniques were adapted to the acoustic signals and tested; the most useful is a combination of wavelet techniques and digital band-pass filtering (WT + BPF). In addition, a first approach for the spatial location of the AES is included (3D mesh with progressive refinement). In short, a complete tool that detects and locates AEs generated by PDs was designed and its resolution is  $1\text{ cm}$ . The statistical analysis of the TOAs of acoustic emissions to several sensors shows that the denoising system obtains significant improvement in noisy environments with weak signals, the detection threshold can be reduced as well as the precision in the determination of the TOAs is improved.

In order to focus on the real application, a multi-channel instrumentation system for the location of PDs in power transformers was presented. It is based on the detection of the AEs from PDs in oil with several PZT and OF sensors. An all-acoustic detection and location approach has been proposed based on a time reference given by one OF sensor installed inside the tank and the TOAs to several PZT sensors installed outside the tank (two in front of each phase windings of a three phase transformer for a typical application). The signal processing includes digital denoising techniques and time-differences LUT based location algorithms implemented with virtual instrumentation (single architecture - LabVIEW). The time-differences LUT algorithm improves the ratio performance over computational cost + complexity of the previous 3D mesh with progressive refinement. In short, a complete tool that detects and locates acoustic emissions generated by partial discharges has been designed with a resolution of  $1\text{ cm}$ . Additionally, an analysis of the error propagation from the TOAs to the location accuracy is done, as well as the influence of the number of sensors and their sites in the 3D location algorithm. This analysis shows that the limiting error is less than  $1\text{ cm}$  when the sensors that are closest to the acoustic emission source are not involved.

The next step was to test the system with real signals from PDs. For that, a complete system of PD detection and localization in HVAC-DC transformers was developed, which integrates in the same system different techniques of PD detection, electrical and acoustic, and it is able to monitor signals received by several types of sensors at the same time. It is worth to mention that an OF sensor for acoustic detection of PD was also integrated in the HVAC-DC experiments and compared to other detection methods and acoustic sensors. The analysis of the recorded PD signals shows that the OF sensor provides information that helps to the assessment of the type and location of PD, not only as a consequence of its withstanding of the harsh environment, but also because it is able to detect PDs in the particular conditions of HVDC

setups. It contributes to another perspective that can be decisive in determining the reliability of the electrical insulation.

With the goal of improving the performance of the global system, hybrid programming is proposed for the detection and localization of AEs. This system with hybrid architecture combines the advantages of LabVIEW for multichannel acquisition and signal denoising and the benefits of Matlab for the processing and data presentation. Both modules are connected via TCP / IP, allowing also remote operation. Different strategies for solving the location equations with a resolution of  $1\text{ mm}$  have been implemented and compared. The PSO and INI strategies of localization were demonstrated as the most efficient in terms of computational and complexity costs versus performance. In addition, an analysis of the error propagation from the TOAs to the results of location was applied to the PSO strategy under different conditions of error magnitude and positions of the acoustic source. The edge, depth and proximity effects were clearly identified during the analysis of the location results. Even so, the maximum relative errors of location (offset and dispersion) are limited to less than the TOA relative mean errors. Results of location accuracy better than  $1\text{ cm}$  in  $1\text{ m}$  were obtained with TOA uniform ( $0\% - 2\%$ ) error distribution.

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

- The design and implementation of a multichannel instrumentation system for the detection and localization of AEs from PDs by combining PZT sensors and FO sensors in an all-acoustic location approach.
- The improvement of the detection and localization of AEs with the proposed sequence of denoising (wavelet and digital filtering).
- The implementation and characterization of a system for the detection and localization of AEs with a resolution of  $1\text{ cm}$  using a single programming architecture (LabVIEW).
- The implementation and characterization of a system for the detection and localization of AEs with a resolution of  $1\text{ mm}$  using a hybrid programming architecture (LabVIEW-Matlab).
- The validation of the system under real conditions of PDs in HVAC-DC experiments.

## 7.2. Future work

Some issues related to the proposals reported in this dissertation can be considered as future research. The following are selected:

- The installation of the instrumentation system for long-term on-line monitoring of power transformers. An approach with external sensors is proposed for the characterization of the measuring system with transformers in service and the validation of acoustic measurements of PDs in field. In addition, it is proposed to install at least one OF sensor inside transformers during the manufacturing process. Therefore, AE tests with both OF and PZT sensors can be incorporated to the set of factory tests.
- The integration of several techniques of PD detection (electrical, UHF, acoustic and multi-point OF sensors) in the same system in order to take advantage of the complimentary virtues of each of them. For example, electrical measurements provide the means of identifying the PD type and failure type in HVAC systems, AE and UHF are non-conventional methods of PD measurement that are becoming common for localization of PD and OF sensors are promising for continuous monitoring.
- To study architectures of acquisition for on-line processing and integration of hardware processing (FPGA/DSP) to increase the speed of computation. A first approach implements the acquisition and denoising of each sensing channel and the parallelization of these tasks for all channels. In addition, cross-correlation among the signals from an AES on several sensing channels could be explored to enable integrating localization strategies in processing hardware or improving the overall detection capability. In this case, managing the high-frequency of the ultrasound signals is a challenge.

## 7.3. List of publications

### Core of the thesis

#### Journals

- I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano and J. A. García-Souto. “Instrumentation System for the Location of Partial Discharges using Acoustic Detection with Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 63, No. 5, pp. 1002-1013, May 2014.
- I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Roman and J. A. García-Souto. “Multichannel Detection of Acoustic Emissions and Localization of the Source by using a Hybrid Programming System”. ISA Transactions, Submitted 2015.

#### Proceedings of SPIE

- I. Búa-Núñez**, C. G. Azcárraga-Ramos, J. E. Posada-Román and J. A. García-Souto, “Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments”, SPIE Proceedings, Vol. 9157, June 2014.

#### IEEE conferences

- I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano and J. A. García-Souto, “Multichannel Acquisition System and Denoising for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 1135-1140.
- I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román and J. A. García-Souto, “Two-Stage Processing System for the Detection and On-Site Localization of Acoustic Emissions”, 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC15), May 2015, pp. 1921-1926.

## National conferences

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Sistema de Instrumentación Multicanal para la Detección y Localización de Descargas Parciales por medio de Emisiones Acústicas con Procesado y Técnicas de Reducción de Ruido”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2012, July 2012.

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Sistema Multicanal de Medida de Emisiones Acústicas de Ultrasonidos para Transformadores Trifásicos”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2013, July 2013.

## Others related to the thesis

### IEEE Conferences

J. E. Posada-Román, J. A. García-Souto, J. Rubio-Serrano and **I. Búa-Núñez**, “Multichannel Ultrasound Instrumentation for On-line Monitoring of Power Transformers with Internal Fiber Optic Sensors”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 200-205.

J. Rubio-Serrano, J. E. Posada-Román, **I. Búa-Núñez** and J. A. García-Souto, “Comparison of processing techniques for optimizing the solid insulation diagnosis based on the detection of acoustic emissions from partial discharges”, 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD13), June 2013, pp. 129-132.

### National Conferences

J. E. Posada-Román, **I. Búa-Núñez**, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Detección de Emisiones Acústicas en Transformadores Trifásicos con Sensores Internos de Fibra Óptica”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2013, July 2013.



# Referencias

## Capítulo 1

- [1.1] A. Cavallini, F. Ciani and G. Montanari, “Improved identification level for defects generating partial discharges in solid insulation systems,” Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '04), Oct. 2004, pp. 422–425.
- [1.2] P. Morshuis and J. J. Smit, “Partial Discharges at dc Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp. 328-340, Apr. 2005.
- [1.3] 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, Feb. 2011.
- [1.4] U. Piovan, “Insulation systems for HVDC transformers: present configurations, trends, challenges, solutions and open points,” Proc. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 254-257 (2013).
- [1.5] P. Morshuis, A. Cavallini, D. Fabiani, G. C. Montanari and C. Azcarraga, “Stress conditions in HVDC equipment and routes to in service failure,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 1, pp. 81-91, Feb. 2015.
- [1.6] L.E Lundgaard, “Partial Discharge XIII, Acoustic Partial Discharge Detection-Fundamental Considerations”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp. 25-31, Jul./Aug. 1992.
- [1.7] L.E Lundgaard, “Partial Discharge XIV, Acoustic Partial Discharge Detection-Practical Application”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, pp. 34-43, Sep./Oct. 1992.

- [1.8] P.M. Eleftherion, “Partial Discharge XXI, Acoustic Emission-Based PD Source Location In Transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 6, pp. 22-26, Nov./Dec. 1995.
- [1.9] “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-immersed Power transformers and Reactors”, IEEE Standard C57.127, 2007.
- [1.10] 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.
- [1.11] 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.
- [1.12] 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.
- [1.13] 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.
- [1.14] 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, Vol. 12, No. 4, pp. 4793–4802, Apr. 2012.
- [1.15] AMSY-6 of Vallen Systeme [Online]. Available: <http://www.vallen.de/products/multi-channel-systems>.
- [1.16] PowerPAC of Physical Acoustics [Online]. Available: <http://www.physicalacoustics.com/by-product/powerpac>.
- [1.17] LAN-XI of Brüel & Kjær [Online]. Available: <http://www.bksv.com/Products/frontends/lanxi>.
- [1.18] PXI of National Instruments [Online]. Available: <http://www.ni.com/pxi/esa/>.

- [1.19] L. Yongfen, X. Xiaohu, D. Fei, T. Xiao, and L. Yanming, "Comparison of DOA Algorithms Applied to Ultrasonic Arrays for PD Location in Oil", *IEEE Sensors J.*, Vol. 15, No. 4, pp. 2316 – 2323, Apr. 2015.
- [1.20] Q. Xie, X. Liu, J. Tao, T. Li, S. Cheng and F. Lu, "Experimental verification of the sparse design of a square partial discharge acoustic emission array sensor", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 26, 045101 (15pp), 2015.
- [1.21] L. Song , K. L. Cooper , Z. Wang , A. Wang and Y. Liu. "Position location of partial discharges in power transformers using fiber acoustic sensor arrays". *Opt. Eng.*, Vol. 45, No. 11, 114401, Nov. 2006.
- [1.22] 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", *Measurement Science and Technology (MST)*, Vol. 24, No. 9, pp. 1-9, Jul. 2013.
- [1.23] P. Kundu, N.K. Kishore and A.K. Sinha, "Identification of two simultaneous partial discharge sources in an oil-pressboard insulation system using acoustic emission techniques", *Applied Acoustics*, Vol. 73, pp. 395-401, Apr.2012.
- [1.24] 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, No. 3, pp. 1663-1673, Jun. 2015.
- [1.25] I. Bua-Nuñez, "Instrumentation System for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions with Processing and Denoising", MSc Thesis Sep. 2012.
- [1.26] S. Sriram et al,"Signal Denoising Techniques for Partial Discharge Measurements", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol 12, No. 6, pp. 1182-1191, Dec. 2005.
- [1.27] S. M. Markalous, S. Tenbohlen and K. Feser. "Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol.15, No. 6, pp. 1576-1583, Dec. 2008.

- [1.28] Gergely Vakulya and Gyula Simon. “Fast Adaptive Acoustic Localization for Sensor Networks”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 60, No. 5, pp. 1820-1829, May. 2011.
- [1.29] J. Ramírez- Niño and A. Pascacio, “Acoustic measuring of partial discharge in power transformers”, Measurement Science and Technology (MST), Vol. 20, No. 11, Nov. 2009.
- [1.30] S. E. U. Lima, O. Frazao, R. G. Farias, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, V. Miranda and J. L. Santos. “Acoustic Source Location of Partial Discharges in Transformers”. Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors - Proceedings of SPIE, Vol. 7653, Sep. 2010.
- [1.31] L. Tang, R. Luo, M. Deng and J. Su. “Study of Partial Discharge Localization using Ultrasonics in Power Transformer based on Particle Swarm Optimization”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 2, pp. 492–495, Apr. 2008.
- [1.32] H. R. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach, M. Zanjani and K. Miralikhani. “A novel method for ultra-high-frequency partial discharge localization in power transformers using the particle swarm optimization algorithm”. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 29, No. 2, pp. 26-39, Mar. 2013.
- [1.33] Prasanta Kundu, N.K. Kishore, A.K. Sinha. “A non-iterative partial discharge source location method for transformers employing acoustic emission techniques”. Applied Acoustics, Vol. 70, No. 11-12, pp. 1378–1383, Dec. 2009.
- [1.34] Y. Lu, X. Tan, X. Hu. “PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer”. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol, Vol. 147, No. 2, pp. 81–85, Mar. 2000.

## Capítulo 2

- [2.1] C. Grosse and M. Ohtsu, “Acoustic Emission Testing” in Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [2.2] A. G. Beattie, “Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques” in Sandia Report, Sep. 2013.
- [2.3] A. Cavallini, F. Ciani and G. Montanari, “Improved identification level for defects generating partial discharges in solid insulation systems,” Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '04), Oct. 2004, pp. 422–425.
- [2.4] “High-voltage test techniques – Partial discharge measurements”, International Standard IEC 60270, 2000.
- [2.5] R. Bartnikas, “Detection of Partial Discharges (Corona) in Electrical Apparatus”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 1, pp. 111-124, Feb. 1990.
- [2.6] J. Rubio-Serrano, M. V. Rojas-Moreno, J. Posada1, J. M. 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (TDEI), Vol. 19, No. 5, pp. 1569-1578, Oct. 2012.
- [2.7] P.H.F. Morshuis “Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some thoughts on progress made and where to go now,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 5, pp. 905-913, Oct. 2005.
- [2.8] Byeong Ha Lee et al., “Interferometric Fiber Optic Sensors”, Sensors, Vol. 12, No. 3, pp. 2467–2486, Feb. 2012.
- [2.9] G. Wild and S. Hinckley, “Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors: Overview and State-of-the-Art”, IEEE Sensors Journal, Vol. 8, No. 7, pp. 1184 - 1193, Jul. 2008.
- [2.10] “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-immersed Power transformers and Reactors”, IEEE Standard C57.127, 2007.
- [2.11] I. Shim, J. J. Soraghan and W. H. Siew, “Detection of PD Utilizing Digital Signal Processing Methods Part 3: Open-Loop Noise Reduction”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 17, No. 1, pp. 6-13, Jan./Feb. 2001.
- [2.12] C. S. Burrus, R. A. Gopinath and H. Guo, “Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms”, Prentice-Hall International, Chs 1, 2, 3 and 10, 1998.

## Capítulo 3

- [3.1] Shuaiyong Li, Yumei Wen, Ping Li, et ál.. “Determination of acoustic speed for improving leak detection and location in gas pipelines”. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 85, No. 2, Paper No. 024901, Feb. 2014.
- [3.2] Chia-Yen Shih and P. J. Marrón, “COLA: Complexity-Reduced Trilateration Approach for 3D Localization in Wireless Sensor Networks”, 2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), Jul. 2010, pp. 24-32.
- [3.3] M. M. Saad, C. J. Bleakley, T. Ballal and D. Dobson. “High-Accuracy Reference-Free Ultrasonic Location Estimation”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, Vol. 61, No. 6, pp. 1561-1570, Jun. 2012.
- [3.4] S. M. Markalous, S. Tenbohlen and K. Feser, “New robust noniterative algorithms for acoustic PD-localization in oil/paper insulated transformers”, 14th Intern. Sympos. High Voltage Engineering, Beijing, China, Paper No. G40, 2005.
- [3.5] “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-immersed Power transformers and Reactors”, IEEE Standard C57.127, 2007.
- [3.6] S. M. Markalous, S. Tenbohlen and K. Feser. “Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol.15, No. 6, pp. 1576-1583, Dec. 2008.
- [3.7] J. Rubio-Serrano, J. Posada, I. Búa and J. A. García-Souto, “Comparison of Processing Techniques for Optimizing the Diagnosis of Solid Insulation based on Acoustic Emissions from Partial Discharges”, *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Jun. 2013, pp. 129-132.
- [3.8] Y. Lu, X. Tan, X. Hu. “PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer”. *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol*, Vol. 147, No. 2, pp. 81–85, Mar. 2000.

- [3.9] J. Ramírez- Niño and A. Pascacio, “Acoustic measuring of partial discharge in power transformers”, *Measurement Science and Technology (MST)*, Vol. 20, No. 11, Nov. 2009.
- [3.10] S. E. U. Lima, O. Frazao, R. G. Farias, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, V. Miranda and J. L. Santos. “Acoustic Source Location of Partial Discharges in Transformers”. *Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors - Proceedings of SPIE*, Vol. 7653, Sep. 2010.
- [3.11] L. Tang, R. Luo, M. Deng and J. Su. “Study of Partial Discharge Localization using Ultrasonics in Power Transformer based on Particle Swarm Optimization”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 2, pp. 492–495, Apr. 2008.
- [3.12] H. R. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach, M. Zanjani and K. Miralikhani. “A novel method for ultra-high-frequency partial discharge localization in power transformers using the particle swarm optimization algorithm”. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 29, No. 2, pp. 26-39, Mar. 2013.
- [3.13] Prasanta Kundu, N.K. Kishore, A.K. Sinha. “A non-iterative partial discharge source location method for transformers employing acoustic emission techniques”. *Applied Acoustics*, Vol. 70, No. 11-12, pp. 1378–1383, Dec. 2009.

## Capítulo 4

- [4.1] 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*, Vol. 12, No. 4, pp. 4793–4802, Apr. 2012.
- [4.2] I. Bua-Nuñez, “Instrumentation System for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions with Processing and Denoising”, MSc Thesis Sep. 2012.
- [4.3] T. Boczar & D. Zmarzly, “Application of Wavelet Analysis to Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 3, pp. 433-449, Jun. 2004.
- [4.4] “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-immersed Power transformers and Reactors”, IEEE Standard C57.127, 2007.
- [4.5] I. Bua-Nuñez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano and J. A. Garcia-Souto, “Multichannel Acquisition System and Denoising for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 1135-1140.



## Capítulo 5

- [5.1] I. Bua-Nuñez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano and J. A. Garcia-Souto, “Multichannel Acquisition System and Denoising for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 1135-1140.
- [5.2] 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*, Vol. 12, No. 4, pp. 4793–4802, Apr. 2012.
- [5.3] I. Bua-Nuñez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano and J. A. Garcia-Souto. “Instrumentation System for the Location of Partial Discharges using Acoustic Detection with Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, Vol. 63, No. 5, pp. 1002-1013, May 2014.
- [5.4] J. Rubio-Serrano, M. V. Rojas-Moreno, J. Posada1, J. M. 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (TDEI)*, Vol. 19, No. 5, pp. 1569-1578, Oct. 2012.
- [5.5] I. Búa-Núñez, C. G. Azcárraga-Ramos, J. E. Posada-Román and J. A. García-Souto, “Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments”, *SPIE Proceedings, 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS23)*, Vol. 9157, June 2014.
- [5.6] P. Morshuis and J. J. Smit, “Partial Discharges at dc Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No. 2, pp. 328-340, Apr. 2005.
- [5.7] 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, Feb. 2011.
- [5.8] U. Piovan, “Insulation systems for HVDC transformers: present configurations, trends, challenges, solutions and open points,” *Proc. IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 254-257 (2013).

- [5.9] P. Morshuis, A. Cavallini, D. Fabiani, G. C. Montanari and C. Azcarraga, "Stress conditions in HVDC equipment and routes to in service failure," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 1, pp. 81-91, Feb. 2015.
- [5.10] I. Bua-Nuñez, J. E. Posada-Roman and J. A. Garcia-Souto, "Two-Stage Processing System for the Detection and On-Site Localization of Acoustic Emissions", 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC15) , May 2015, pp. 1921-1926.
- [5.11] I. Bua-Nuñez, J. E Posada-Roman and J. A. Garcia-Souto. "Multichannel Detection of Acoustic Emissions and Localization of the Source by using a Hybrid Programming System". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, Submitted 2015.

# Anexos

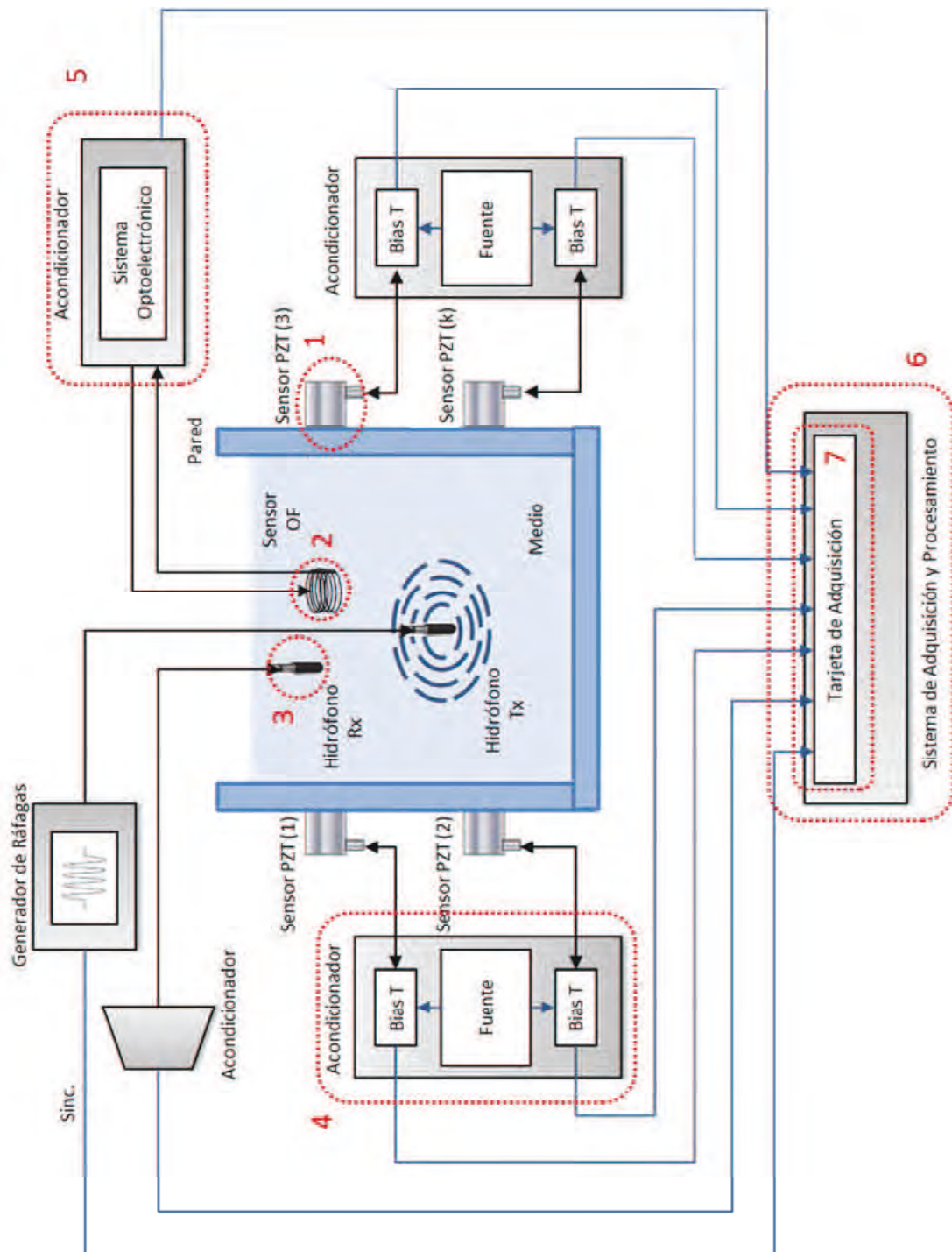
**Anexo I: *Laboratorio de caracterización de emisiones acústicas***

**Anexo II: *Diagrama de bloques con algoritmo de centro de masas***

**Anexo III: *Diagrama de bloques LabVIEW del programa de comunicación TCP/IP***



# Anexo I: Laboratorio de caracterización de AE





# R15I-AST Sensor

## Integral Preamplifier

### Acoustic Emission Sensor

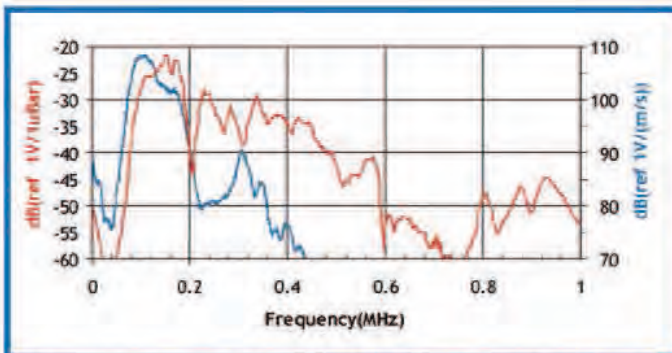
#### Description and Features

PAC's integral preamp sensors were specifically engineered to attain high sensitivity and have the capability to drive long cables without the need for a separate preamplifier. Incorporating a low-noise input, 40 dB preamplifier and a filter all inside the sensor housing, these transducers are completely enclosed in metal stainless steel (or aluminum) housings that are treated to minimize RFI/EMI interference. Care has also been taken to thermally isolate the critical input stage of the preamplifier in order to provide excellent temperature stability over the range of -35° to 75° C.

Their integrated Auto Sensor Test (AST\*) capability allows these sensors to pulse as well as receive. This feature lets you verify the sensor coupling and performance at any time throughout the test.

#### Applications

This general purpose sensor provides a good mix of high sensitivity and high low frequency rejection. These properties make it very useful for monitoring common structures such as pipelines, vessels, bridges, and storage tanks in petroleum, refineries, chemical plants, offshore platforms, as well as factory and process monitoring applications. It is PAC's most popular and highest volume selling sensor.



Frequency response of the R15I-AST. Calibration based on ASTM E 1106; Calibration based on ASTM E976.

#### Operating Specifications

##### Dynamic

Peak Sensitivity, Ref V/(m/s) .....	109 dB
Peak Sensitivity, Ref V/μbar .....	-22 dB
Operating Frequency Range .....	80-200 kHz
Resonant Frequency, Ref V/(m/s).....	75 kHz
Resonant Frequency, Ref V/μbar .....	150 kHz
Directionality.....	+/-1.5 dB

##### Environmental

Temperature Range .....	-35 to 75°C
Shock Limit .....	500 g
Completely shielded crystal for maximum RFI/EMI immunity	

##### Physical

Dimensions.....	1.13" diameter x 1.23" h .....(29 x 31 mm)
Weight.....	70
Case Material.....	Stainless Steel (304)
Face Material.....	Ceramic
Connector.....	BNC
Connector Locations .....	Side

#### Ordering Information and Accessories

R15I .....	R15I-AST
Cable (specify cable length) .....	1234 - X
Magnetic Hold-Down .....	MHR15I
Amplifier .....	AE2A

##### Sensors include

NIST Calibration Certificate & Warranty

\*AST – Auto Sensor Testing feature allows AE systems to control the sensor as a pulser and a receiver at the same time. It can therefore characterize its own condition as well as send out a simulated acoustic emission wave that other sensors can detect, so the condition of the nearby sensors also can be tested.

## TECHNICAL SPECIFICATIONS

Product Code	SCSM-633-HP1
Operating Wavelength	600 - 760 nm
Cut-off wavelength	< 600 nm
Mode field diameter @ 633 nm	4.0 ± 0.5 μm
Numerical aperture (nominal)	0.13
Attenuation @ 633 nm	< 12 dB/km
Cladding diameter	125 ± 1 μm
Coating diameter	245 ± 10 μm
Core-clad concentricity	< 0.5 μm
Proof test level	≥ 200 kpsi
Coating material	UV-Cured Dual Acrylate

For more information contact us at [opticalsales@stockeryale.com](mailto:opticalsales@stockeryale.com) or call a sales representative at (603) 870-8286.



Corporate Headquarters  
32 Hampshire Road  
Salem, New Hampshire 03079 USA  
603 893 8778  
Fax: 603 893 5604  
[opticalsales@stockeryale.com](mailto:opticalsales@stockeryale.com)  
[www.stockeryale.com](http://www.stockeryale.com)

StockerYale and the StockerYale logo are trademarks of StockerYale, Inc. All other brand and product names are trademarks or registered trademarks of their respective holders.

Copyright © February 2005 StockerYale, Inc. Printed in the USA  
All rights reserved. SOF-040-02

# Product Data

## Hydrophones — Types 8103, 8104, 8105 and 8106

### USES:

- Calibration reference standard
- Ultrasonic measurements in liquids
- Cavitation measurements
- Laboratory and industrial measurements in liquids and gases
- As underwater projectors (8103, 8104 and 8105)
- Noise measurements in humid and polluted atmospheres

### FEATURES:

- Frequency ranges from 0.1 Hz to 180 kHz
- Individually calibrated; traceable to NIST
- Flat frequency response over wide range
- Omnidirectional over wide frequency range
- Working pressures up to  $9.8 \times 10^6$  Pa (100 atm. [1000 m])
- Shielded-element construction
- Highly corrosion resistant

### ADDITIONAL FEATURES 8103:

- Very small size (50 × 9.5 mm)
- -3 dB limit in air at 15 kHz
- Double-shielded low-noise integral cable

### ADDITIONAL FEATURES 8105:

- Omnidirectional over full frequency range
- No metallic parts exposed
- -3 dB limit in air at 7 kHz

### ADDITIONAL FEATURES 8106:

- High sensitivity: -174 dB re 1 V/μPa
- Built-in preamplifier with provision for insert-voltage calibration
- Durable construction
- Equivalent noise level well below sea-state zero

The Brüel & Kjær range of hydrophones is a range of individually calibrated waterborne-sound transducers which have a flat frequency response and are omnidirectional over a wide frequency range. Their construction is such that they are absolutely waterproof and have good corrosion resistance. There are four types of Brüel & Kjær Hydrophone:

Type **8103** is suitable for laboratory and industrial use and particularly for the acoustic study of marine animals or for cavitation measurements.

Type **8104** is ideal for calibration purposes.

Type **8105** is a robust spherical hydrophone usable down to 1000 m ocean depth with excellent directional characteristics, being omnidirectional over 270° in the axial plane and 360° in the radial plane.

Type **8106** has a built-in amplifier which gives a signal suitable for transmission over long underwater cables. It is usable down to 1000 m ocean depth.

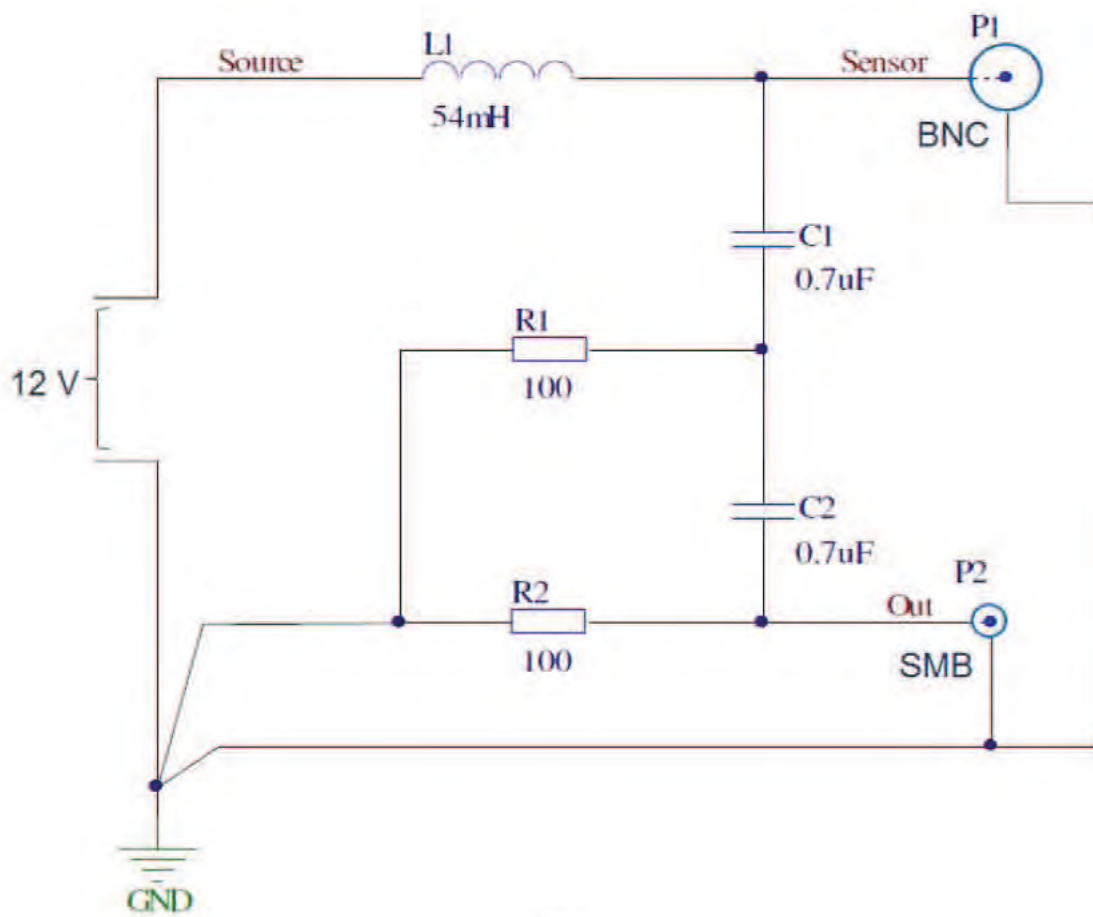




4



a)



b)

Figura 1. Imagen del Bias-T de 8 canales en a) y esquemático del Bias-T de un canal en b).

# Manual instrumento interferómetro de fibra óptica

Característica	Magnitud
Forma de onda	Seno
Amplitud	1 V
Frecuencia	100 Hz
Componente DC	0 V

Tabla 1. Características de la señal de calibración.

Interruptor	Posición
GAIN	25K
ESTAB.	OPEN LOOP

Tabla 2. Posición de los interruptores para configurar el interferómetro en modo calibración.

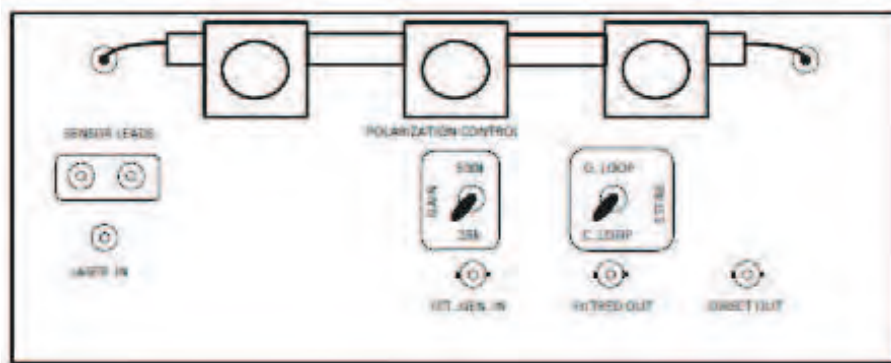


Figura 1. Detalle del panel central del interferómetro.

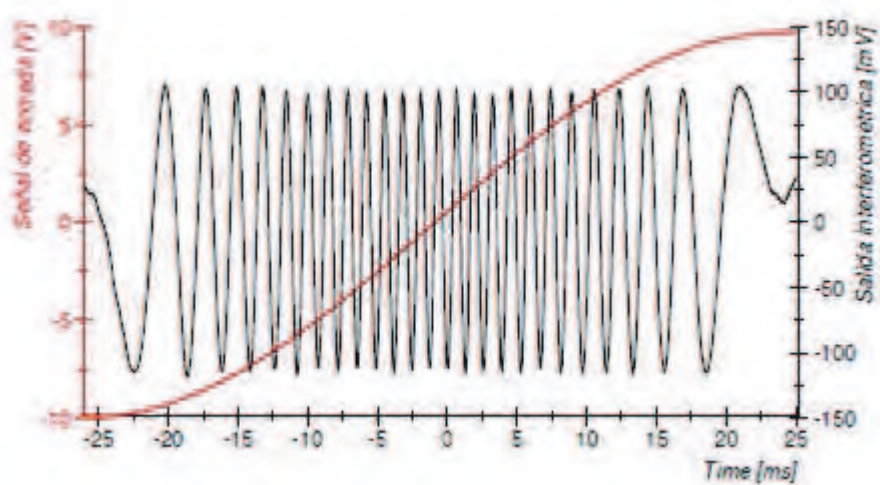


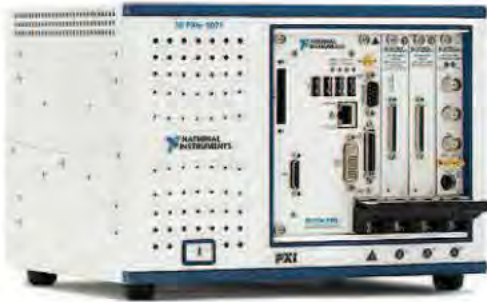
Figura 2. Resultado de la medida del rango de compensación del modulador de fase.

Ordering Information | Detailed Specifications

For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2014-11-06 07:14:11.0

## NI PXIe-1071 4-Slot 3U PXI Express Chassis



- Compact form factor - ideal for desktop, rack-mount, or portable applications
- 3 peripheral slots - accepts 3U PXI Express and CompactPCI Express, PXI and CompactPCI modules in every slot
- Up to 1 GB/s per-slot dedicated bandwidth (x4 PCI Express), 3 GB/s total system bandwidth
- Low-jitter 10 MHz and 100 MHz reference clocks with 25 ppm stability
- No system timing slot
- 230 W total power available from 0 to 50 °C
- HALT-tested for increased reliability
- Field-replaceable fan
- Optional rack-mount kit
- Optional handle and side feet kit

### Overview

The NI PXIe-1071 chassis kit consists of a low-cost, compact 4-slot chassis featuring a 4-slot-wide system controller slot, which can accept either an embedded controller or a remote controller, and three peripheral slots. The NI PXIe-1071 offers the flexibility to populate each peripheral slot with either a PXI Express module or PXI module. In addition, it features compact, rugged packaging and quiet operation, which make it ideal for portable, desktop, and industrial control applications.

[Back to Top](#)

### Application and Technology

#### High-Performance Backplane

This chassis enables high-bandwidth systems and provides the flexibility you need to work with both PXI and PXI Express modules. The NI PXIe-1071 features three PXI Express slots and four PXI hybrid-compatible slots. PXI hybrid-compatible slots can accept either a PXI Express module or a standard PXI module.

The PXI Express system slot offers three x4 PCI Express links (1 GB/s single direction per link) connected to the three peripheral slots. In addition, there is one x1 PCI Express link to a PCI Express-to-PCI translation bridge on the backplane. The three PXI Express hybrid slots deliver connectivity to either a x4 PCI Express link or to the 32-bit, 33 MHz PCI bus on the backplane.

# 60 MS/s, 60 MHz, 12-Bit, 8-Channel Digitizers

## NI 5105

- 8 channels simultaneously sampled at 12-bit resolution
- 60 MS/s real-time sampling
- 60 MHz bandwidth
- 50 mV<sub>pp</sub> to 30 V<sub>pp</sub> input range
- 72 dBc SFDR
- 16, 128, or 512 MB of onboard memory
- Edge, window, hysteresis, and digital triggering

### Calibration

- Gain, offset, frequency response, and timing self-calibration
- 2-year external calibration interval

### Operating Systems

- Windows Vista/XP/2000
- LabVIEW Real-Time

### Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows™/CVI
- Measurement Studio for Visual Studio
- LabVIEW SignalExpress

### Driver Software (included)

- NI-SCOPE driver
- LabVIEW Express VIs
- Scope Soft Front Panel



## Overview

- Applications**
- Imaging**
  - Ultrasonic nondestructive test
  - Optical coherence tomography
  - Medical imaging
- Aerospace/Defense**
  - RADAR, SONAR, and LIDAR
  - Satellite
  - Signal intelligence
- Consumer Electronics**
  - DVD, DVD R, and PVR
  - Set-top box
  - Gaming console
- Communications**
  - DSL

National Instruments 5105 high-resolution digitizers feature eight 60 MS/s simultaneously sampled input channels with 12-bit resolution, 60 MHz bandwidth, and up to 512 MB of memory in a compact, 3U PXI/PXI Express or PCI device. An NI 5105 uses the National Instruments Synchronization and Memory Core (SMC) architecture, so you can combine multiple

devices to build up to 136 phase-coherent channels in a single PXI chassis. You can also synchronize an NI 5105 with other analog and digital instruments to create mixed-signal test systems. An NI 5105 is ideal for a wide range of applications including ultrasonic nondestructive test (NDT), medical imaging, scientific research, military/aerospace, and consumer electronics.

### Eight 60 MS/s, 12-Bit Input Channels for Time and Frequency Analysis

- 60 MHz input bandwidth with antialias and noise filters
- >72 dBc spurious-free dynamic range (SFDR)
- Independent channel-selectable 50 mV<sub>pp</sub> to 30 V<sub>pp</sub> input ranges
- Independent channel-selectable 50 Ω or 1 MΩ input impedance
- 2-year calibration interval and 0 to 55 °C operating temperature

### Deep Onboard Memory

- 16, 128, or 512 MB of onboard memory
- Capture more than 1 million triggered waveforms in multiple record mode, with hardware trigger rearming
- Stream data continuously from onboard memory to host memory or disk

### Triggering, Clocking, and Synchronization

- Edge, window, hysteresis, and digital triggering
- Pretrigger and posttrigger acquisition in single- and multiple-record mode
- Internal 60 MHz clock or external clock from 4 to 65 MHz
- Phase lock to PXI 10 MHz reference or external reference from 1 to 20 MHz
- Timestamp-triggered events with 100 ps resolution

### Software

- VI-compliant NI-SCOPE driver for NI LabVIEW and LabWindows/CVI as well as Microsoft C++ and Visual Basic with more than 50 built-in measurements
- Scope Soft Front Panel for interactive control

### Ordering Information

NI PXI-5105 .....	779685-0M <sup>1</sup>
NI PCI-5105 .....	779686-0M <sup>1</sup>

<sup>1</sup>M (onboard memory): 1 (16 MB), 2 (128 MB), 3 (512 MB)  
Includes NI-SCOPE driver and Scope Soft Front Panel.

### Recommended PXI Switch

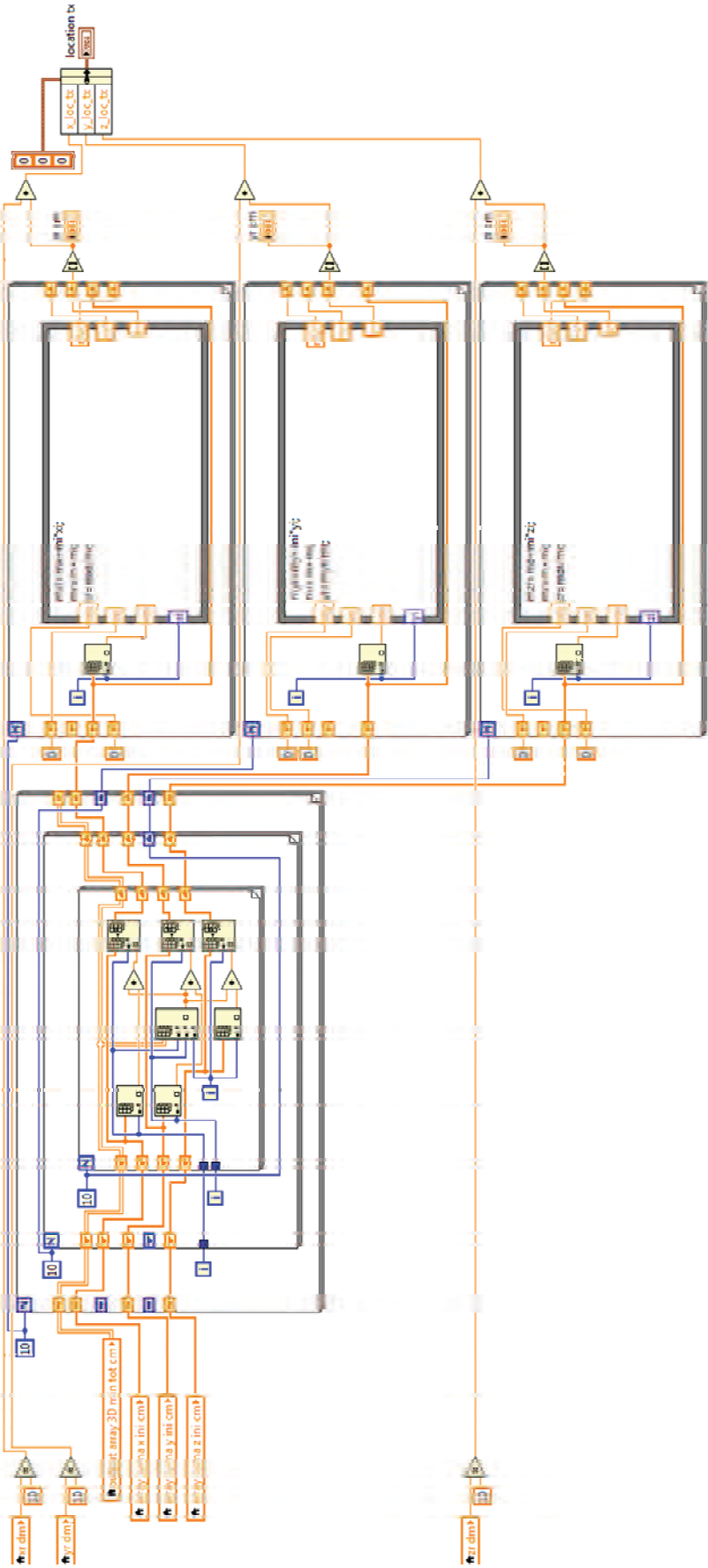
NI PXI-2593 (500 MHz mux/matrix) .....	778793-01
--	-----------

### BUY NOW!

For complete product specifications, pricing, and accessory information, call 800 813 3693 (U.S.) or go to [ni.com/digitizers](http://ni.com/digitizers).

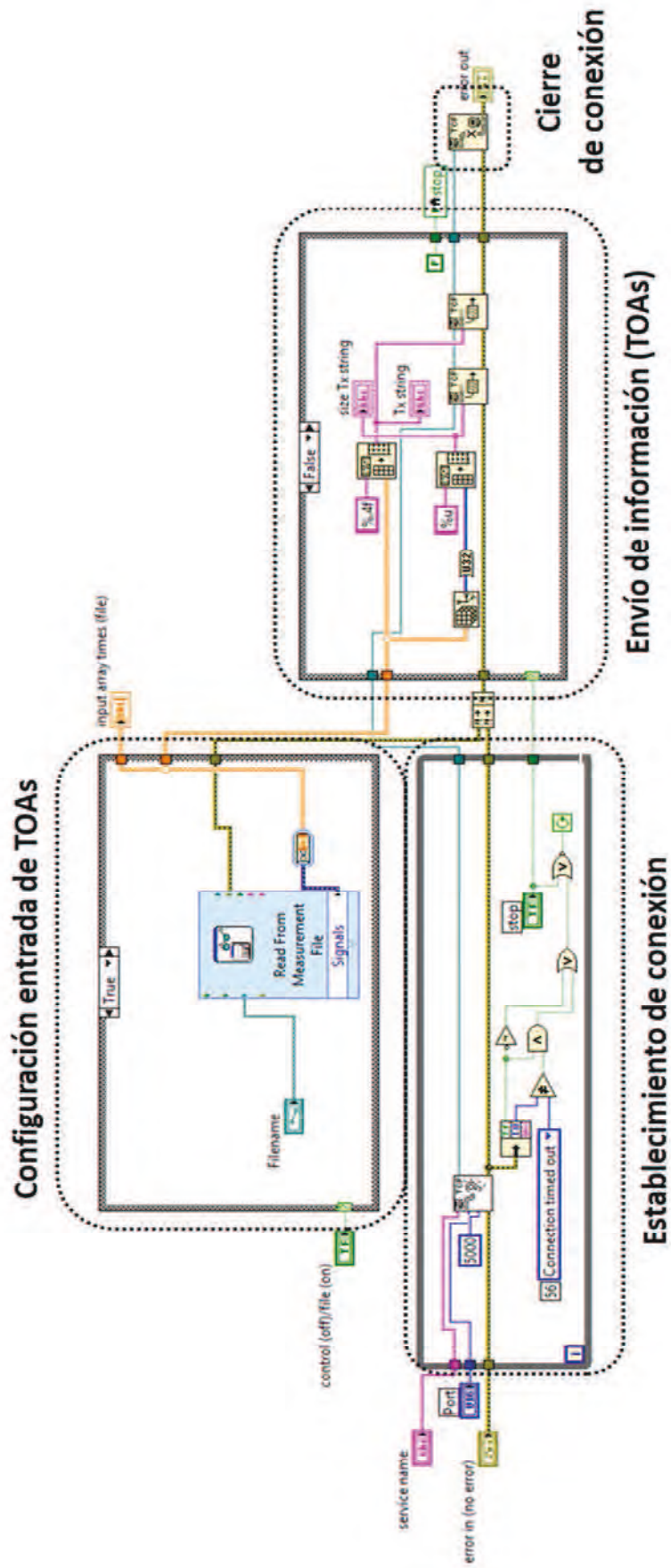


# Anexo II: Algoritmo de centro de masas en VI





# Anexo III: Comunicación TCP/IP en VI







## *Extended Summary*

### *PhD THESIS*

# *Multichannel Instrumentation with Implementation of Denoising Techniques and On-line Processing for Ultrasound Detection. Application to the Localization of Acoustic Emissions from Partial Discharges*

**Author:**

**Iago Búa Núñez**

**Director/Tutor:**

**José A. García Souto**

**DEPARTMENT OF ELECTRONICS TECHNOLOGY**

**Leganés, 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 an extended summary, with special emphasis on 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. In addition, the papers that report the major contributions of this research are attached to the document.



# Abstract

The measurement of partial discharges (PD) is a very reliable indicator of the degradation of the electrical insulation. For this reason, it is very interesting to monitor this activity with the aim of analyzing high-voltage electrical equipment such as transformers, and to study the probability of failure. In this sense, new technologies have been developed for the detection of PD, which incorporate digital techniques of signal processing (digital filtering, wavelets, etc.). Among the methods of PD detection in transformers, the acoustic detection has great advantages in terms of immunity to electromagnetic interference and easier installation in the field. Ultrasonic piezoelectric sensors (PZT) are typically used for the acoustic detection, which are located externally on the transformer tank walls and distributed to provide information about the location of the PD source. A localization process can be applied based on the times of arrival (TOA) of the acoustic emissions (AE) to the sensors. Currently, other sensors that use optical fiber (OF) are being developed. These sensors are immersed in the insulating medium, thus they detect more intense sound signals, free of interference from the multipath and with better signal to noise ratio.

In this research work, a multichannel instrumentation system for the detection and the localization of AE from PD is proposed on the base of using together internal OF intrinsic sensors and external ultrasonic PZT sensors. This system has specific hardware blocks of acoustic signal conditioning and acquisition on PXI platforms and several software blocks for detecting and locating the acoustic signals.

For implementing the software, two types of architectures are proposed in this work. The first one is a single architecture that utilizes only virtual instruments (VI) to implement all the stages and operations in LabVIEW. This architecture includes software blocks of acquisition, detection and noise reduction (denoising). Different techniques were adapted from electrical PD denoising and implemented for the acoustic measurements; the most useful are a wavelet filtering plus a digital implementation of the filters recommended in the standard (WT + IEEE FILTER). This denoising system obtains significant improvements in noisy environments with weak signals, allowing to reduce the detection threshold one order of

magnitude and to improve the precision in the determination of the TOA, which is the base of the accuracy in the localization process. These were experimentally characterized with the developed system.

The architecture integrates a location stage in the VI structure and different trilateration strategies are implemented to find out the position of the acoustic emission source (AES) through the TOA. The first approach is divided into two parts of progressive refinement to reduce the computational time, but obtaining an adequate spatial resolution. First, a coarse location is performed in *dm* and second, a finer location in *cm* is obtained within the solution of the first part. In order to improve the ratio of performance over computation + complexity costs a second approach was implemented. This is based on time-differences patterns that are formed for each position in the transformer by mapping the internal structure and dimensions of the transformer as lookup tables. The source is located by comparing the measured time-differences vector with the time-differences lookup tables.

The second architecture is hybrid, which combines two programming tools (LabVIEW – Matlab) in order to improve the performance of the system. The communication between both tools is through a packet transfer protocol (Transmission Control Protocol / Internet Protocol - TCP/IP). The system is divided in two parts: the first is a VI inspired design and is devoted to the processes of acquisition, denoising and detection. As part of this processing the TOA are obtained and they are transferred to the next part. The second part is programmed in Matlab and it is dedicated to locating the AES. It solves the equations system of trilateration for a 3D model of localization. Several strategies are implemented and compared: the Solve Method, the Least Squares Method, the Least Norm Method, the Method of Cramer, the Indirect Non-Iterative Method and the Particle Swarm Optimization Method.

Additionally, the system was installed for monitoring experiments of PDs in real conditions of High Voltage Alternating Current (HVAC) and High Voltage Direct Current (HVDC). It is worth to mention that the characterization of the insulation in these high-voltage AC-DC systems is a challenge for the transportation network and this PD monitoring system provides a state-of-the-art tool for this purpose by combining acoustic detection, optical fiber sensing and localization of the source of PD.

**Keywords:** Acoustic Emission, Ultrasound Detection, Source Location, Partial Discharges, Multichannel Instrumentation System, Optical Fiber Sensors, Denoising, LabVIEW, Hybrid Programming (LabVIEW - Matlab).

# Contents

1. Introduction.....	147
2. Acoustic emissions from partial discharges.....	153
3. Sensors, conditioning and acquisition.....	159
4. Denoising .....	163
5. Characterization of the system.....	165
6. Location architecture 1 and characterization .....	171
7. Measurements in conditions of high voltage direct current (HVDC).....	181
8. Location architecture 2 and characterization .....	187
9. Conclusions.....	197
10. List of Publications.....	201
11. Attached Publications.....	203
Acoustic Detection and Localization of PD using PZT and OF Sensors .....	203
Acoustic Detection of PD in HVDC-AC Setups .....	217
Detection of AE and Localization of AES by using a Hybrid Programming System .....	223
References.....	237





# Introduction and Objectives

## **1. Introduction**

In current society, the supply of electrical energy is a concept of vital importance and it should be guaranteed at any time and place. Therefore, the application of maintenance strategies is essential, which involves the monitoring, analysis and diagnosis of plants and equipment for the generation, transmission and distribution of energy. The interest in the measurement of partial discharges (PDs) has been increased in recent years because PDs represent a very reliable indicator of the degradation of electrical insulation [1]. For this reason, the monitoring of PDs activity is a major tool for analyzing high-voltage electrical equipment, such as transformers on HVAC (High Voltage Alternating Current) and transformers on HVDC (High Voltage Direct Current) [2-5], and studying the probability of failure.

The acoustic emission (AE) is a classic technique of monitoring structures under stress (e.g. thermal, mechanical, etc.) and given that the PDs are the product of electrical stress on the material, also releases AEs. Therefore, it has been proposed for a long time transferring some of the AE monitoring techniques to detect PDs [6-8], which subsequently resulted in a standard [9]. In addition, it opens the possibility to locate the acoustic emission source (AES) and with that the source region of the precursor of failure. The acoustic detection has major advantages regarding electromagnetic interference immunity, it provides information for locating the AES, as the times of arrival (TOAs) of the signal to the sensors, and it is easier to install in field.

Regarding the detection of AEs from PDs, piezoelectric sensors of Lead Zirconate Titanate (PZT) are typically used. In addition, other sensors that use optical fiber (OF) are being developed [10-14]. In the case of detection of PDs in transformers, these OF sensors are very suitable because they are embedded in the insulating medium (integrated with the pressboard or immersed in oil) and can detect the acoustic signal directly within the transformer tank, whereas the PZT sensors are located externally on the walls. The OF sensors can be installed during construction of the equipment, while the PZTs can be installed on equipment already deployed in field. The advantages of both have been taken into account in

this research work for proposing an all-acoustic measurement system with internal FO sensors and external PZT sensors.

In the field of acoustic detection, several companies offer their equipment based on proprietary systems for specific applications that solve different aspects of the detection and processing of AE signals. Main modules are for multichannel acquisition; some of them include integrated processors and others are connected to an external PC (Personal Computer). They are usually modular devices that integrate power supplies, data acquisition cards, processors and even FPGAs (Field Programmable Gate Array). Some companies offer very specific systems oriented AE (ultrasounds) as AMSY-6 of Vallen Systeme [15] or PowerPAC of Physical Acoustics [16]; other companies offer instrumentation systems for microphones, hydrophones and vibration as LAN-XI of Brüel & Kjær [17]; and others acquisition and processing systems oriented virtual instrumentation on instrumentation chassis as PXI (Peripheral Component Interconnect (PCI) eXtensions for Instrumentation) of National Instruments [18]. The instrumentation system that is proposed in this work includes PXI hardware. Besides having specialized modules for acquisition and signal processing, PXI platforms provide software flexibility by virtual instrumentation.

There has been important research effort with respect to the hardware for AE monitoring, such as data acquisition and communication systems. Main topics of interest in acoustic monitoring of PD are also related to the subject of AE, but they are focused on sensor arrays [19- 20], fiber optic sensing arrays and fiber optic multichannel systems [21-22]. The ultimate objective of an automatic AE monitoring system is the identification of the AES and its localization, which is the same in the case of PD monitoring [23-24].

Different techniques from electrical PD denoising [25] have been used for acoustic measurements in a previous work (master thesis [26]). The main objective of that analysis was to reduce the detection threshold and, in these terms, the most useful are wavelet techniques and digital band-pass filtering (WT + BPF). This denoising system obtains significant improvements in noisy environments with weak signals, allowing also to improve the precision in the determination of the TOAs.

The method most used in the spatial localization of the AES is the trilateration [27-34]. It is the process of determining absolute or relative locations of points by measurement of distances, using the geometry of circles, spheres or triangles. These distances are calculated through the TOAs, which are the arrival times of the acoustic signal to each sensor. With the TOAs, it is already possible to solve the system of location equations. Former work in this area undertakes global positioning system (GPS) algorithms for localization of AES in

transformers [27]. Other studies present adaptive methods [28], iterative methods [29] and non-iterative methods [33].

In this dissertation, basically, an all-acoustic multichannel instrumentation system for the detection and the localization of AEs from PDs is proposed. This system must be based on the combined use of internal OF sensors and external ultrasonic PZT sensors. It should also include hardware of acoustic signal conditioning and acquisition and software for detecting and locating AEs.

At this point, two alternatives arise. The first one is based on a system entirely oriented to virtual instrumentation (VI) (LabVIEW) and more recently; the second one includes hybrid systems, which integrate more than one type of programming (Matlab-LabVIEW). The first hybrid system overcomes the limitations of the VI to implement more complex mathematical algorithms, which allows improving the performance of the system.

It is also important to mention that the characterization of the insulation in high-voltage Alternating Current and Direct Current (AC+DC) systems is a challenge for the transportation network and specific PD monitoring systems should be demonstrated in these setups and installations. Therefore, the system will be tested in real HVDC+AC setups.

## **Objectives**

The main objective of this research work is to design and implement a multichannel instrumentation system for the detection and localization of AEs from PDs.

To achieve this objective, the following specific goals are set out:

- To develop a full multichannel acquisition system for monitoring signals picked up by several acoustic sensors of different type.
- To include a sequence of signal processing using denoising techniques and evaluate its impact on the improvement of the detection and localization of AEs.
- To analyze different localization algorithms, techniques for measuring TOAs and strategies for solving the location equations, and evaluate two different architectures: single (LabVIEW) and mixed-hybrid (LabVIEW - Matlab).
- To test the entire system with AEs in the Laboratory of Acoustic Testing and with PDs (HVAC-DC) in high voltage setups and installations representative of the real conditions.

## **Dissertation outline**

The document of the PhD Thesis is divided into three main parts. In the first part an introduction to the theory and the study of the state of the art are performed. The detection of AEs from PDs is presented in Chapter 2. First, the AE are stated in general terms and after, it focuses on specific AEs from PDs. Detection systems of AEs are also described in this chapter, including acoustic sensors (PZT and OF sensors), acquisition devices, detection methods based on thresholding and denoising techniques (Wavelet Filtering and Digital Band-pass Filtering).

This first part also addresses the issue of AEs localization in Chapter 3. This chapter starts explaining the main location algorithm, which are the Trilateration and the different approaches for the measurement of the TOAs (Absolute Time, Time-differences and Pseudo-times). The chapter continues with the description of the techniques of measurement of TOAs (Threshold, Energy Criterion, Akaike Information Criterion and Cross-Correlation) and it ends with the strategies for solving the location equations (Global Positioning System, LookUp Tables, Newton-Rapshon, Matrix Resolution and Particle Swarm Optimization).

The second part describes the architecture and the processing software for the multichannel detection and localization of AEs (Chapter 4). This part gives a detailed description of the software and hardware designed and implemented in this thesis. First, it presents the main components of the hardware: the PZT and OF sensors, the conditioning and the acquisition system. Then, the implemented blocks of software are described in detail: the acquisition, denoising, identification and localization of PDs. The section devoted to the localization describes the different architectures and the different location algorithms that were implemented.

In the third part, the setups and experimental results of detection and location of AEs and PDs are described (Chapter 5). These experiments range from localization based on 3D mesh with progressive refinement, localization based on time-differences lookup tables, detection of PDs in HVDC conditions and detection and localization of AEs using a hybrid programming system.

Finally, the conclusions and future works are presented in Chapter 6. The final section of this extended summary is literally the 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 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. Applied to the localization and analysis of PD in high power transformers,*” (DPI2009-14628-C03-0, coordinator Prof. José Antonio Garcia Souto).

The scholarship FPI-MICINN (*Formación de Personal Investigador*) No. BES-2010-042083 is associated to 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 characterization of acoustic emissions from PD in HVAC experiments 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 and HVAC-DC setups were carried out in collaboration with the Department of Electrical Engineering of the University of Bologna, Italy. A research stay of 3 months (14 September 2013 – 14 December 2013) has been made under the supervision of Prof. Andrea Cavallini.



## **2. Acoustic emissions from partial discharges**

### **2.1. Detection of acoustic emissions from partial discharges**

The interest in the measurement of partial discharges (PD) [35] has been increased in recent years because they represent a very reliable indicator of the degradation of electrical insulation. For this reason, the monitoring of that activity is very interesting with the aim of analyzing high-voltage electrical equipment such as transformers (Figure 1) and studying the probability of failure.

PD is a localized dielectric breakdown of electrical insulation system under high voltage stress, so it represents a reliable indicator of the degradation of the insulation, as it was said previously. For that, the study of its activity [35] helps to detect and prevent failures in high-voltage electrical equipment such as transformers (Figure 1).

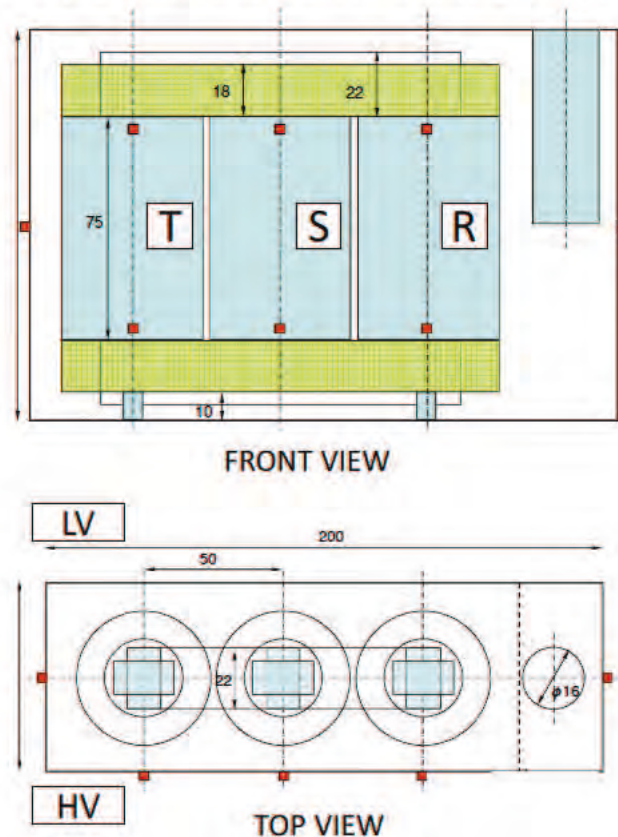


Figure 1. Three-phase transformer (front view and top view in cm).

Within the methods of PD detection in transformers (electrical, UHF, acoustic, chemical, optical, etc.), acoustic detection has the advantages, previously exposed, of electromagnetic interference immunity, it provides information for locating the source of AE and it is easy to install in field [1-8]. Most acoustic detection systems are focused on corona

PD [9, 36]; these discharges are of higher intensity and they have a high signal to noise ratio. However, the internal PD and surface PD are less intense and their detection is greatly affected by the noise level. Figure 2 shows the acoustic signals generated by different types of PD obtained in the laboratory.

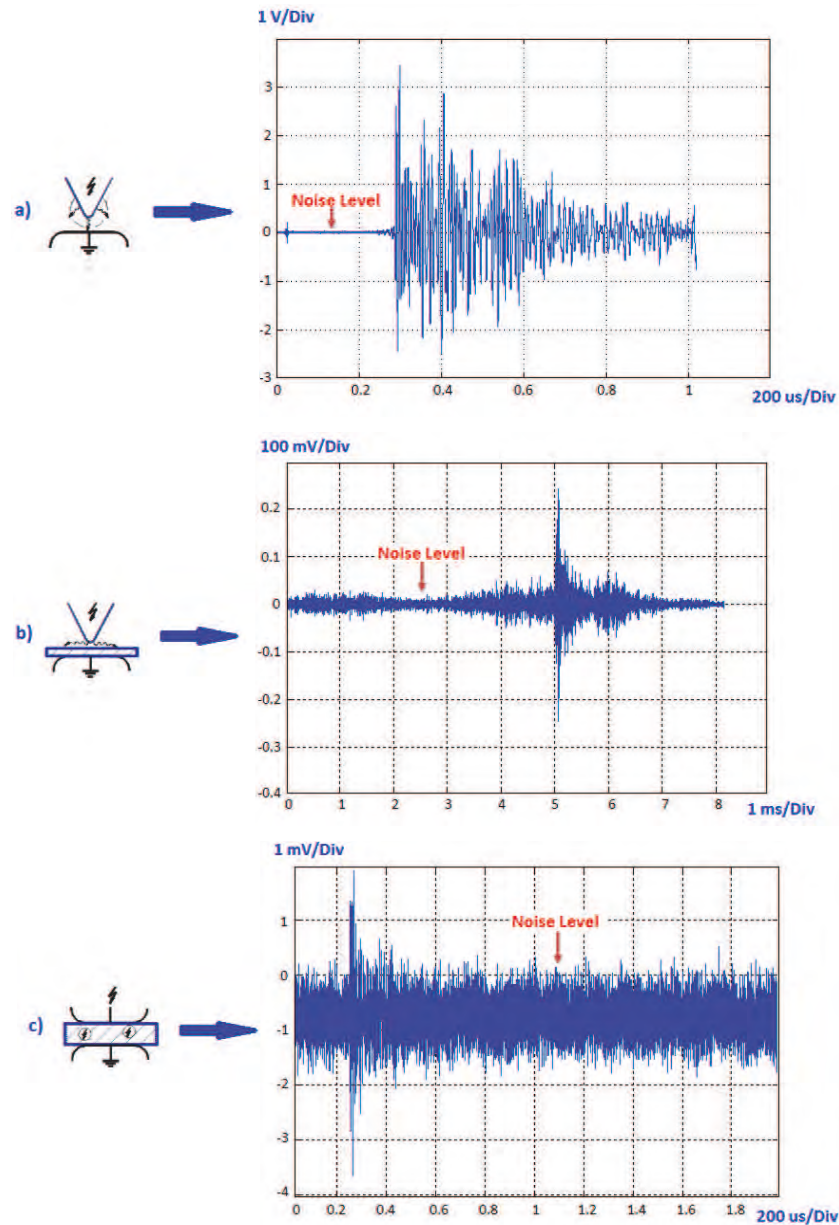


Figure 2. Acoustic signals generated by corona PD (a), surface PD (b) and internal PD (c).

There are several digital techniques of signal processing (digital filtering, wavelet, etc.) applied to the detection of PD, but they are focused on the electrical method of PD measurement [25]. There are scarcely a few techniques demonstrated in acoustic measurements and deployed in real applications [37]. To address the problem of internal and surface PD acoustic detection, some of these denoising techniques used in electrical PD



measurements will be considered for acoustic measurements, as well as the optimal sequence of processing.

In this work a combined use of PZT and OF sensors is proposed. The PZT sensors are located externally on the walls of the transformer tank. The OF sensors are suitable for noisy environments with weak signals because they are embedded in the insulating medium. The piezoelectric (PZT) ultrasonic sensors are typically used for acoustic detection; these sensors are located externally on the walls of the transformer tank. Currently other techniques using sensors of optical fiber (OF) are being developed. These sensors are suitable for noisy environments with weak signals because they are embedded in the insulating medium. They can detect the acoustic signal without the influence of the walls acoustic interface, that causes undesirable effects like signal distortion and strong attenuation (only 10% of the acoustic signal is detected outside the tank). They are immune to electromagnetic interference. It is possible to undertake the installation of one optical fiber sensor in each transformer in use, although it would be interesting to have a multiple installation that is possible in the fabrication process of a new transformer. The optical fiber sensor is used for monitoring the AE of PD activity as well as it is the reference for the location process assisted by external PZT sensors. The location is done when the PD activity exceeds a threshold. The PD activity is acoustically characterized in terms of the amplitude and the number of pulses (repetition rate) and the threshold is a combination of both and their evolution with time that is determined by expert observation. Typical procedures with transformers include several PD detection methods for the assessment of the insulation; they use to compare the measurements with those obtained in laboratory tests and in the start-up of the transformer on-site.

Until present different instrumentation systems and measurement methods were reported related to the detection of partial discharges. They were as follows: electrical measurements and calibration of the charge, very high frequency and ultra-high frequency. However, the problem of defect location is still actual in power transformers because it is a complex and difficult issue. Therefore, new instrumentation systems that can improve the process of defect location and make it more reliable are important. Few results are reported on location and they are based on a highly persistent and repetitive acoustic emission from the damaged region. This even allows auscultation of the apparatus with only one sensor. However, simultaneous detection of the acoustic emission in several sensors and the possibility of on-line location is a new concept in order to face a predictive maintenance. In addition, acoustic emissions from sporadic PD activity and from incipient defects should be considered before a serious damage occurs.

Until present different instrumentation systems and measurement methods were reported related to the detection of partial discharges. They were as follows: electrical measurements and calibration of the charge [38-40], very high frequency [41-42] and ultra-high frequency [43]. However, the problem of defect location is still actual in power transformers because it is a complex and difficult issue. Therefore, new instrumentation systems that can improve the process of defect location and make it more reliable are important. Few results are reported on location and they are based on a highly persistent and repetitive acoustic emission from the damaged region [44]. This even allows auscultation of the apparatus with only one sensor [45]. However, simultaneous detection of the acoustic emission in several sensors and the possibility of on-line location is a new concept in order to face a predictive maintenance. In addition, acoustic emissions from sporadic PD activity and from incipient defects should be considered before a serious damage occurs.

## 2.2. Location of acoustic emissions from partial discharges

The common technique for spatial location of PD is the trilateration, as it was already mentioned in the introduction. This technique determines the position of the AES by measuring the TOAs [27-34].

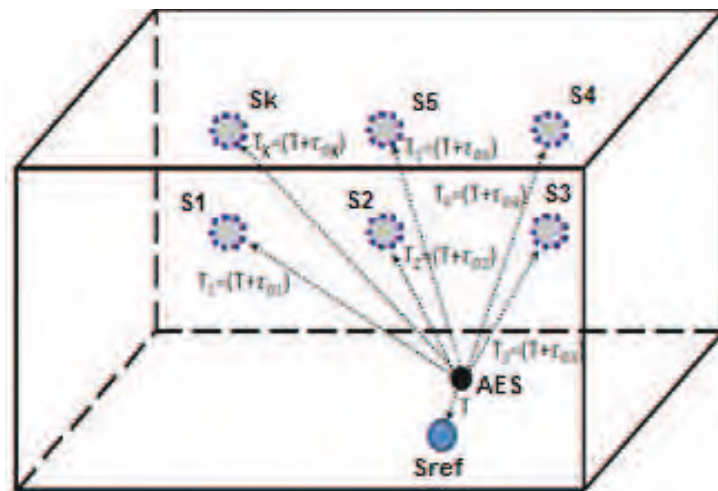


Figure 3. Acoustic sensors on a cubic tank with the AES inside.

Figure 3 shows a schematic of a cubic tank with  $k+1$  acoustic sensors, the AES inside and the resulting times of arrival:  $T$  from the reference sensor to the AES and  $T_k$  from the other sensors to the AES.

There are several approaches to trilateration. In this research work the time-differences approach has been chosen because it is used an all-acoustic detection scheme. In this case, the acoustic wave reaches the nearest sensor first (straight propagation is assumed) and it triggers the process of recording the signals from all sensors simultaneously.

$K$  time-differences ( $\tau_{0i}$ ) are obtained from  $k+1$  sensors and the reference is from the sensor closest to the AES ( $T$ ). Figure 4 shows the time differences of the acoustic signals with an unknown timing reference.

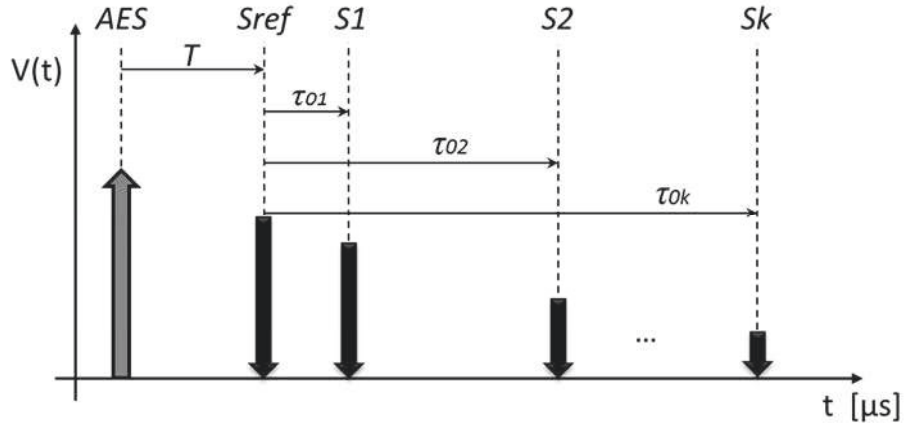


Figure 4. Time differences in reference to an unknown time reference  $T$ .

For the time-differences approach, the system of nonlinear equations of localization is as follows:

$$(x - x_{Sref})^2 + (y - y_{Sref})^2 + (z - z_{Sref})^2 = (v_s \cdot T)^2 \quad (5)$$

$$(x - x_{Sk})^2 + (y - y_{Sk})^2 + (z - z_{Sk})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{0k}))^2, \quad k=1..N \quad (6)$$

where  $v_s$  is the speed of sound in the medium,  $x_{ref}$ ,  $y_{ref}$  and  $z_{ref}$  are the coordinates of the reference sensor and  $x_{Sk}$ ,  $y_{Sk}$  and  $z_{Sk}$  are the coordinates of the  $k^{th}$  sensor. The minimum number of sensors is 5 ( $N \geq 5$ ). The position is determined by obtaining  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $T$ .

There are different techniques for determining the TOA applied to the signals from PD, but it is common to use threshold or envelope threshold [9]. Other techniques are based on Energy Criterion (EC) or Akaike Information Criterion (AIC) [27], Universal Wavelet Filtering (UWF) [37], cross-correlation with a pattern waveform that can be determined from wavelet components [46]. In this work the algorithm is based on an automatic peak detector in which the time instant is registered when a percentage of the maximum peak is reached [47].

Former work in this area undertakes global positioning system (GPS) algorithms for transformer PD source location [27]. Other studies present adaptive methods [28], iterative

methods [29] and non-iterative methods [33]. In this research work, several methods and strategies for solving the equation system of trilateration are implemented and tested.

### **3. Sensors, conditioning and acquisition**

#### **3.1. Detection with PZT sensors**

The PZT ultrasonic sensors are typically used for acoustic detection [9]. These sensors work with ultrasonic frequencies and are mounted externally on the walls of the acoustic test tank or the transformer.

The instrumentation system based on PZT sensors is described in Figure 5. The model of the PZT sensor is a R15I-AST (Physical Acoustic Corporation), with the following characteristics: operating range *80-200 kHz*, resonant at *150 kHz*, low noise preamplifier integrated of *40dB*. The sensitivity of these sensors is about *1V/Pa*. Because the sensor R15I has integrated electronics but it has not separate ports for power and output, a Bias-T circuit is necessary.

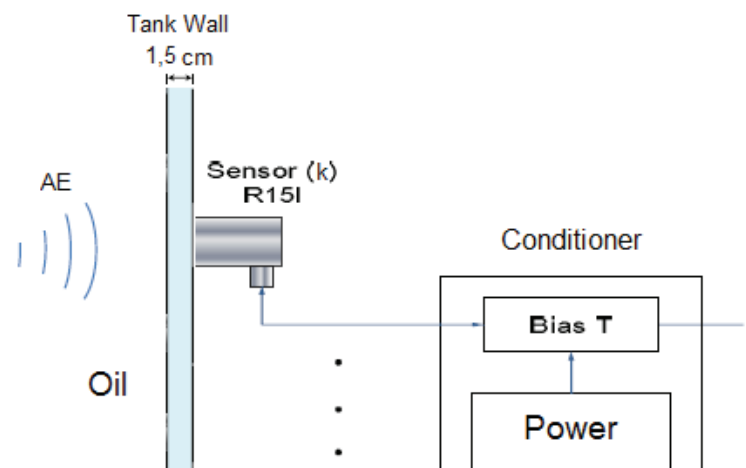


Figure 5. Instrumentation system based on PZT sensors (R15I).

#### **3.2. Optical fiber sensors**

OF sensors [12-14] can be embedded in the insulating medium of the tank closer to the emission source, which allow to detect a stronger acoustic signal, and due to their wide directivity they are able to cover the entire tank. This sensor monitors the acoustic activity and it generates an alarm when the amplitude and the repetition rate increase above a certain level or their evolution with time get a certain slope. For example, three times the activity of the start-up installation activates a warning and five times activates an alarm. It is similar in the case of considering the averaging slope. The OF sensor also provides the time reference in the location process when using external PZT acoustic sensors after a warning.

The instrumentation scheme for the optical fiber sensor has been designed in a previous work [14] and it is shown in Figure 6.

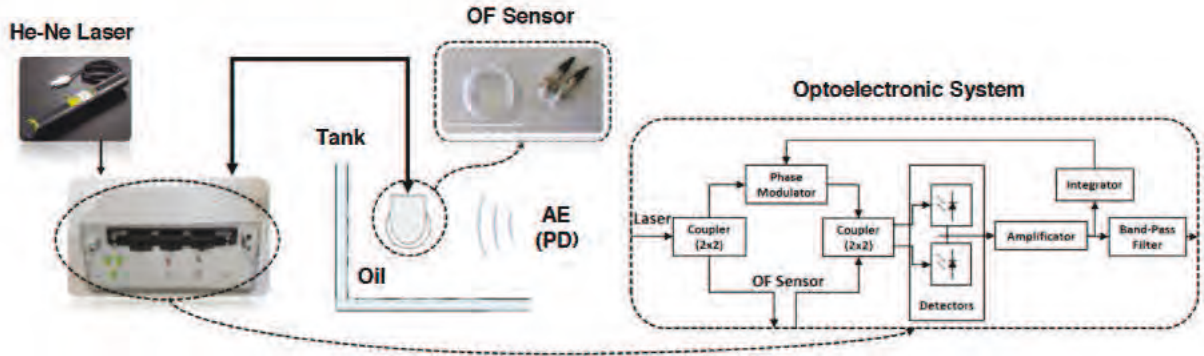


Figure 6. Instrumentation system based on OF sensors.

This scheme consists of a sensor head of single-mode optical fiber illuminated by a He-Ne laser (633nm) and an optoelectronic conditioner. It is sensitive to AE of 150 kHz (TABLE I).

TABLE I. CHARACTERISTICS OF THE OF SENSOR

# Layers of the sensor	Fiber length (m)	Sensitivity (@150 kHz)	
		(mrad/Pa)	For 20V output range (mV/Pa)
2	6.8	0.46	4.6
5	17	1.1	11.1

The conditioning system is based on an interferometer, an electro-mechanical actuator to compensate disturbances of low frequency, an amplifier of transimpedance with two detectors in differential configuration and a stage of band-pass filtering. This device provides a voltage output proportional to the optical phase which is in turn proportional to the acoustic pressure.

The interferometer detects the optical phase change ( $\Delta\phi$ ) that is linearly proportional to the acoustic pressure change ( $\Delta P_r$ ):

$$\Delta\phi = \frac{\phi_0}{P_0} \Delta P_r \quad (1)$$

where  $P_0$  is a factor that depends on the strain-optic coefficients, the Young modulus and the Poisson ratio.  $\phi_0$  is obtained:

$$\phi_0 = \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda} \quad (2)$$

where  $L$  is the length of the fiber exposed to the AE,  $n_{eff}$  is the effective refractive index of the optical fiber and  $\lambda$  is the optical wavelength.

This device provides a voltage output ( $V_s$ ) proportional to the optical phase change ( $\Delta\phi$ ) given by:

$$V_s = 2I_0 \Delta\phi R \eta G_T G_F \quad (3)$$

where  $I_0$  is the mean optical power at each photo-detector,  $R$  is the responsivity of the photo-detectors,  $\eta$  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.

If the equation (1) is substituted in the equation (3), the result is a voltage output proportional to the acoustic pressure change as follows:

$$V_s = 2I_0 \frac{\phi_0}{P_0} \Delta P_r R \eta G_T G_F \quad (4)$$

### 3.3. Multichannel Acquisition System

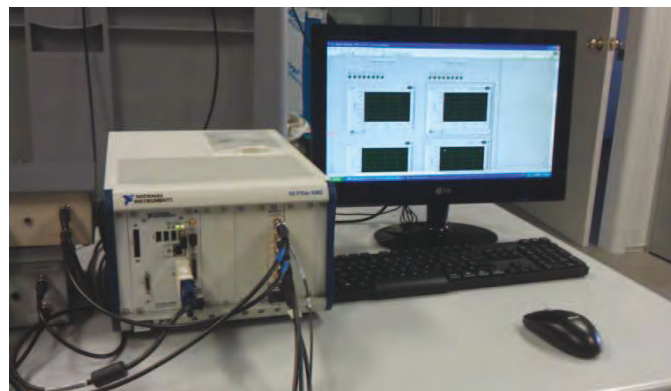
An industrial PXI has been used in order to integrate into the same system different types of sensors (PZT, OF, etc.) and signal processing units. The PXI system (National Instruments) is a PC-based open platform for test, measurement and control. It includes a data acquisition module (NI PXI-5105) with 8 channels of simultaneous acquisition of 12-bit resolution, 60 MS / s acquisition rate in real time, 60 MHz bandwidth and 128 MB onboard memory (Figure 7). The graphical programming tool used is LabVIEW.



a)



b)



c)

Figure 7. Platform PXI a), module NI PXI-5105 b) and multichannel acquisition system of the laboratory.



## 4. Denoising

Different techniques from electrical PD denoising were used for acoustic measurements in the master thesis [26]; the most useful were wavelet techniques and digital filtering. Wavelet filtering (WT) [37] is useful for eliminating Gaussian and white noise, improving the resolution in the detection of transient signals due to the bursts of ultrasounds as those generated by partial discharges. However, using only this technique, it is not possible to eliminate monochromatic and interfering noise. This is solved by a post-processing with a band-pass digital filter (BPF) in the frequency range of interest. This band-pass filter is compliant with the IEEE standard [9] that proposes a filter with cut-off frequency of  $100\text{-}300\text{ kHz}$  to remove vibrations caused by pumps and fans ( $<30\text{ kHz}$ ), the Barkhausen noise ( $\approx 50\text{ kHz}$ ), etc.

After comparing different techniques applied to acoustic detection, the most suitable system for detecting partial discharges is a combination in sequence of both methods (WT + BPF) [48]. This sequence is illustrated in Figure 8.

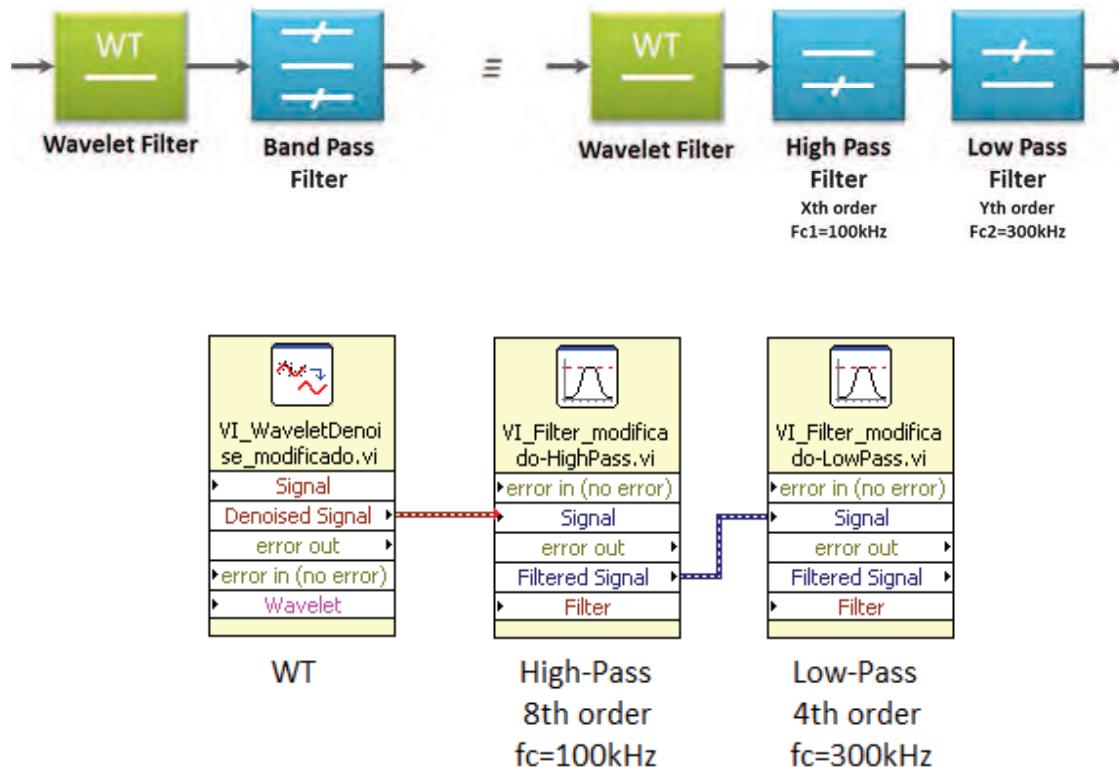


Figure 8. Denoising sequence: wavelet and BPF. Example of operation.

Figure 9 shows an example of operation.

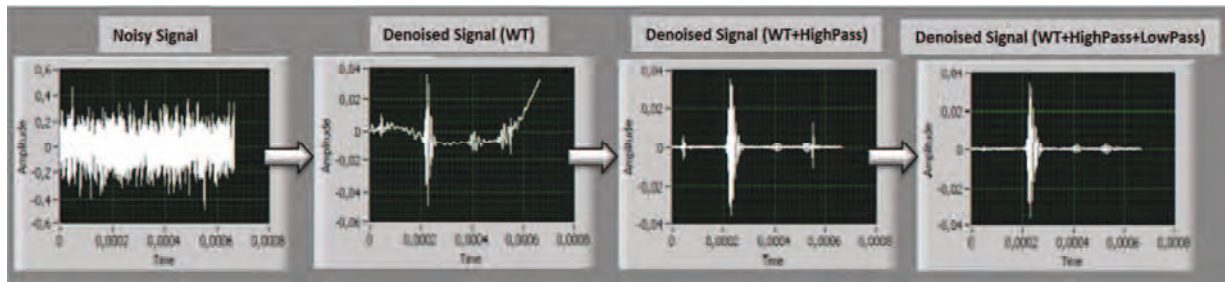


Figure 9. Example of operation.

However, a deeper analysis, derived from the master thesis, demonstrated that the wavelet filtering was sufficient to remove the interfering noise when the threshold applied in the filtrate was calculated for each level of decomposition separately rather than the same for all levels.

In this research work a sequence of both methods (WT + BPF) has been included. The techniques can be used alone or together, but in the case of use together they can be in this order.

## 5. Characterization of the system

### 5.1. Experimental setup

With the aim of producing a real acoustic environment that emulates the acoustic emission from partial discharges in a transformer, an experimental platform has been built (Figure 10 and Figure 11) [48].

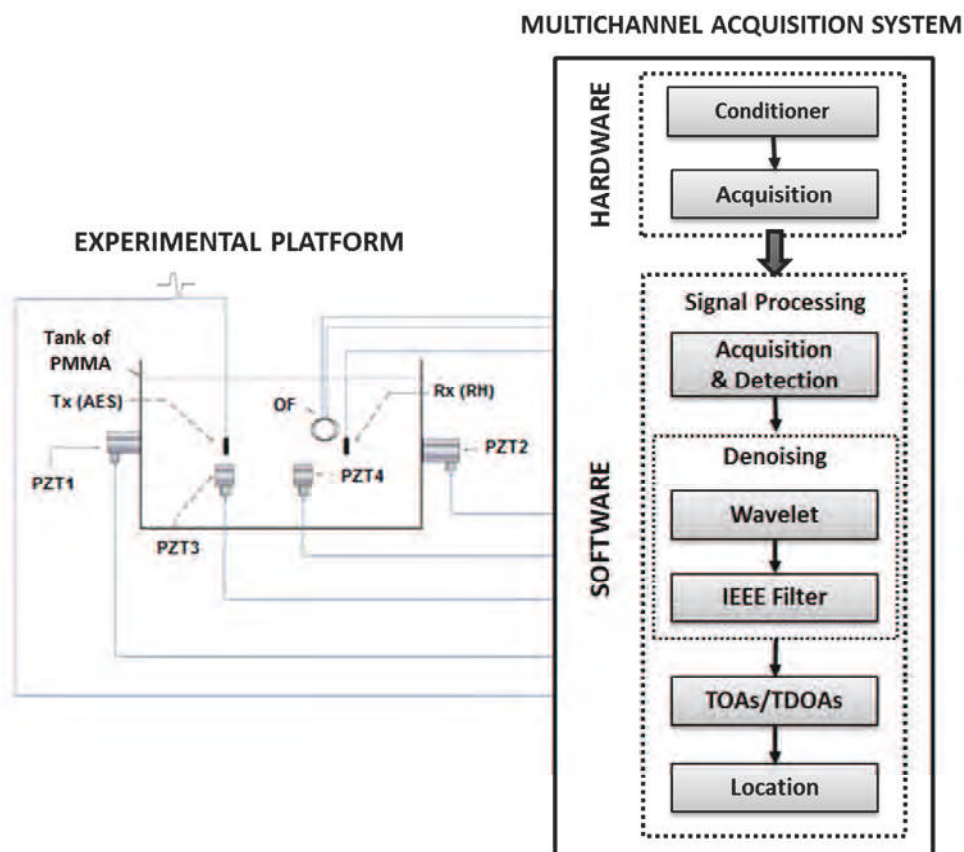


Figure 10. Multichannel instrumentation system for the detection and location of acoustic emissions.

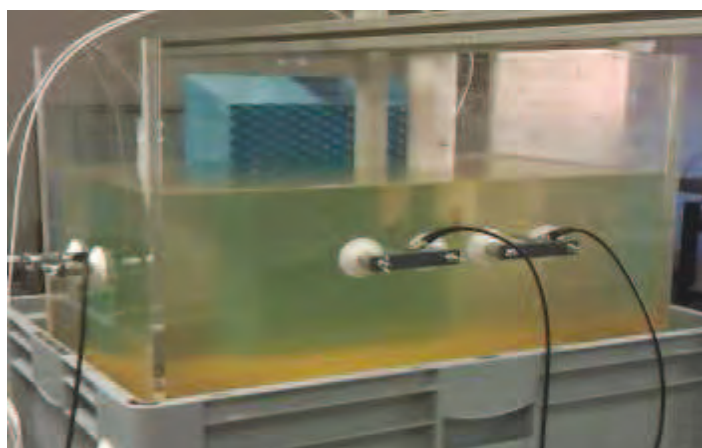


Figure 11. Acoustic test platform

The experimental platform consists mainly of a container with cubic shape, whose dimensions are  $70\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ . Its walls are of PMMA (polymethylmethacrylate) and they have a thickness of  $1.5\text{ cm}$ . The platform includes four PZT sensors (R15I-AST) in the tank walls, an OF sensor inside and a receiver hydrophone (RH) also inside the tank. A wave generator applied to a PZT ultrasonic transducer (B&K 8103) is used as AES.

The multichannel acquisition system integrates hardware of conditioning and acquisition, and software of detection and location of AEs.

## 5.2. Location algorithm

This algorithm, implemented entirely in LabVIEW, uses the TDOAs to determine the position of the AES. With  $k+1$  acoustic sensors ( $k$  sensors + 1 reference sensor), the system is solved by scanning  $(x, y, z)$ , treating separately  $k$  equations resulting from the combination of the reference sensor with the other, the goal is to eliminate the unknown  $T$ :

$$\begin{aligned}
 (x - x_{OF})^2 + (y - y_{OF})^2 + (z - z_{OF})^2 &= (v_s \cdot T)^2 \\
 (x - x_{PZTk})^2 + (y - y_{PZTk})^2 + (z - z_{PZTk})^2 &= (v_s \cdot (T + \tau_k))^2 \\
 \Downarrow \\
 \sqrt{(x - x_{OF})^2 + (y - y_{OF})^2 + (z - z_{OF})^2} &= v_s \cdot T \\
 \sqrt{(x - x_{PZTk})^2 + (y - y_{PZTk})^2 + (z - z_{PZTk})^2} &= v_s \cdot T + v_s \cdot \tau_k \\
 \Downarrow (-) \\
 \sqrt{(x - x_{PZTk})^2 + (y - y_{PZTk})^2 + (z - z_{PZTk})^2} - & \\
 -\sqrt{(x - x_{OF})^2 + (y - y_{OF})^2 + (z - z_{OF})^2} - v_s \cdot \tau_k &= 0
 \end{aligned} \tag{7}$$

Thus, they are  $k$  equations analyzed separately whose solutions will be addressed together to determine the location of acoustic emission.

The location program is divided into two parts of progressive refinement. A first part performs a coarse location ( $7 \times 4 \times 5\text{ dm}$ ) and a second part performs a finer location ( $10 \times 10 \times 10\text{ cm}$ ) within the solution of the first part, as it is shown in Figure 12. The aim of this method is to reduce the computation time.

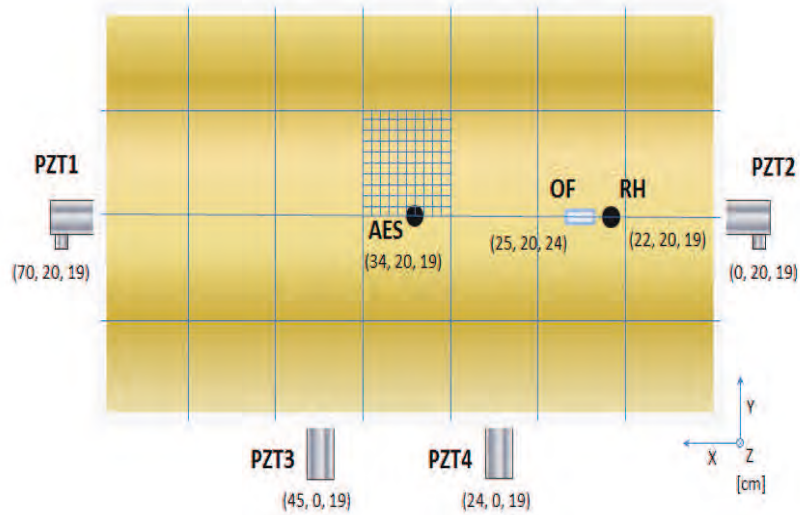


Figure 12. Experimental platform for the location of the emission source.

If there is more than one solution, caused by edge effects, the equation of center of mass is used for the final choice:

$$s_c = \frac{\sum_i n_{c_i} \cdot i}{\sum_i n_{c_i}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i n_{c_i} \cdot i \quad (8)$$

where  $c$  is the coordinate  $x, y$  or  $z$ ,  $i$  is the coordinate value (in  $dm$   $x \rightarrow i \in [0, X)$ ,  $y \rightarrow i \in [0, Y)$ ,  $z \rightarrow i \in [0, Z)$ ),  $n_{c_i}$  the total number of solutions for each coordinate value and  $N$  the total number of solutions. This method is applied three times ( $x, y, z$ ) to determine the value of each coordinate.  $s_c$  is obtained by applying the equation and making a common rounding ( $c=a.b \rightarrow$  if  $b < 5$   $c=a$  and if  $b \geq 5$   $c=a+1$ ).

### 5.3. Location of Acoustic Emissions. Analysis of the dispersion of arrival times

The accuracy in the location is analyzed through the dispersion in the results of the arrival times for various tests, and the results were compared with and without denoising processing (Figure 13).

An extended rule is to fix the detection threshold at 3 times the amplitude of the noise. In this case, the amplitude is adjusted to lower levels (signal amplitude less than three times the noise amplitude: Signal/Noise - SN < 3) in order to analyze the benefits of the processing over attenuated received signals even below the noise level.

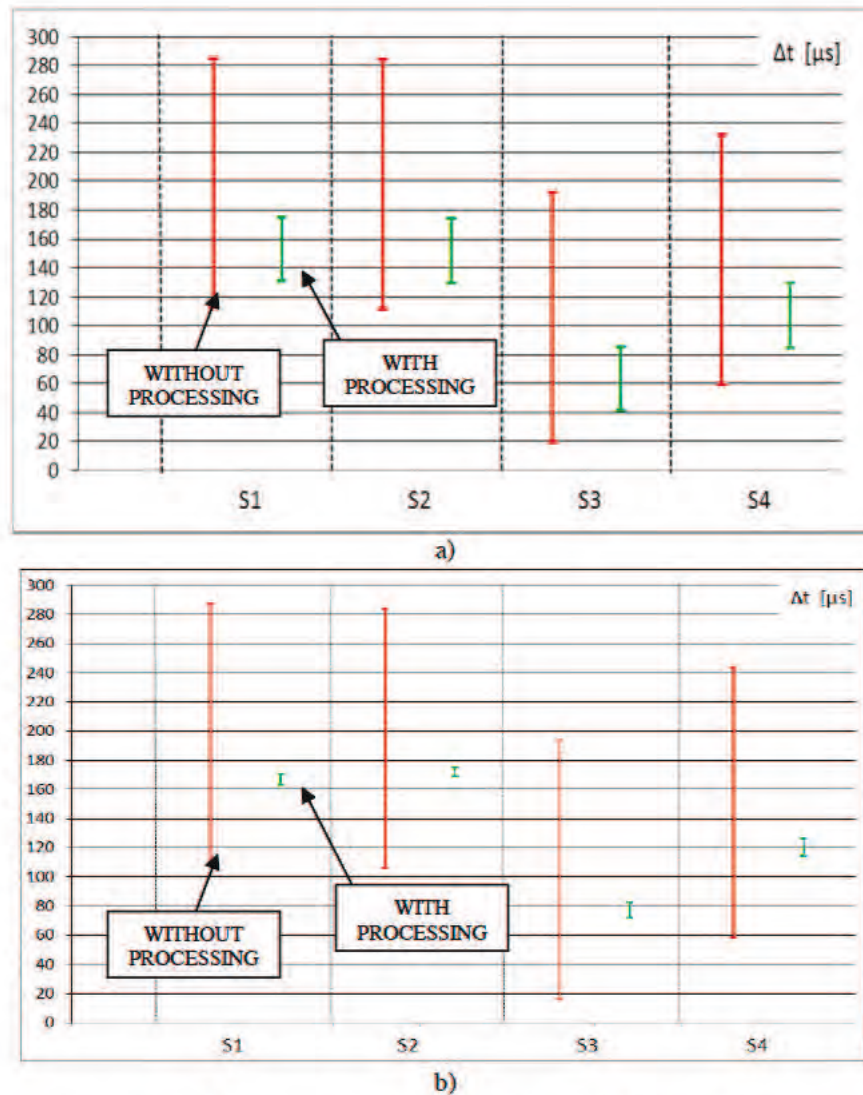
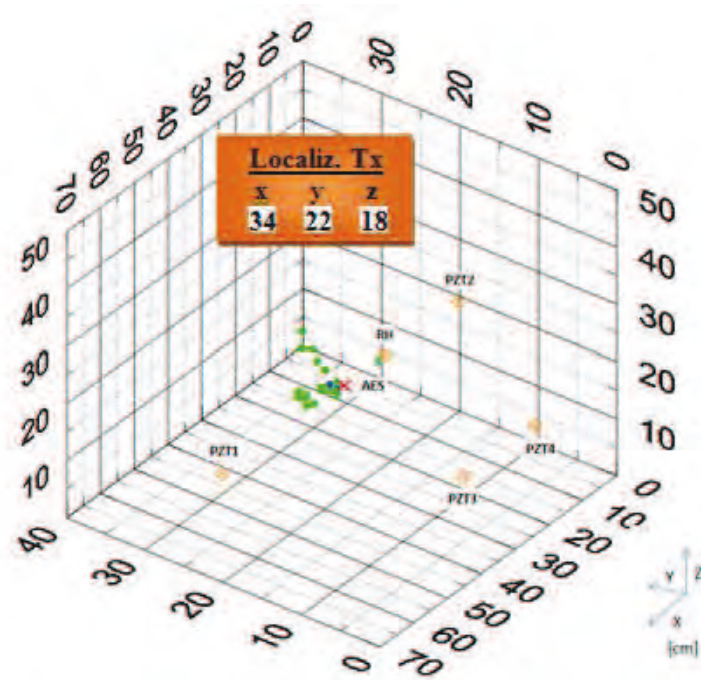


Figure 13. Dispersion results of the arrival times to the PZT sensors S1 to S4: relative to the time reference of the OF sensor (64 Pa) in a) and the RH (18 Pa) in b).

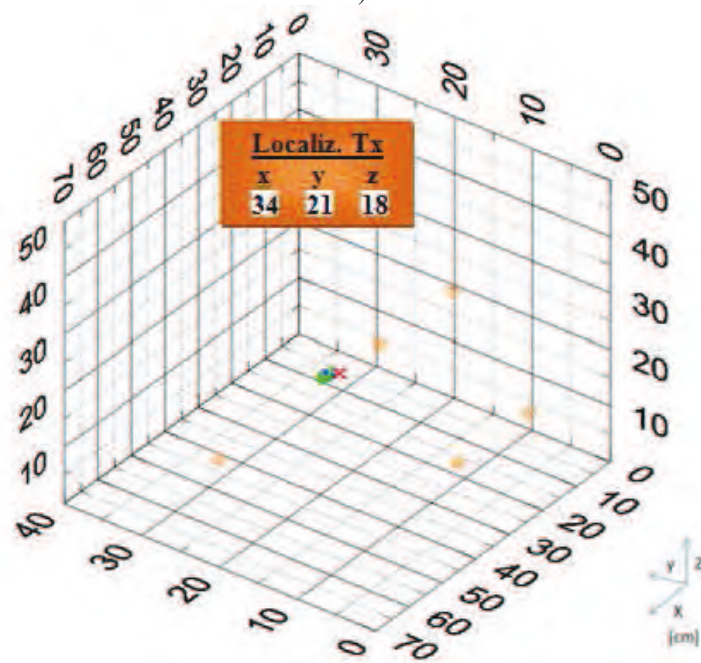
Figure 13 show that the influence of the denoising sequence in the dispersion of the arrival times is decisive (green dispersion bars).

#### 5.4. Location of Acoustic Emissions. Application of the location algorithm

In order to check the location algorithm (B) the same tests as in the previous paragraph are performed using the calculated arrival times (242 AEs). In this case, the characteristics of the experimental platform are depicted in Figure 12.



a)



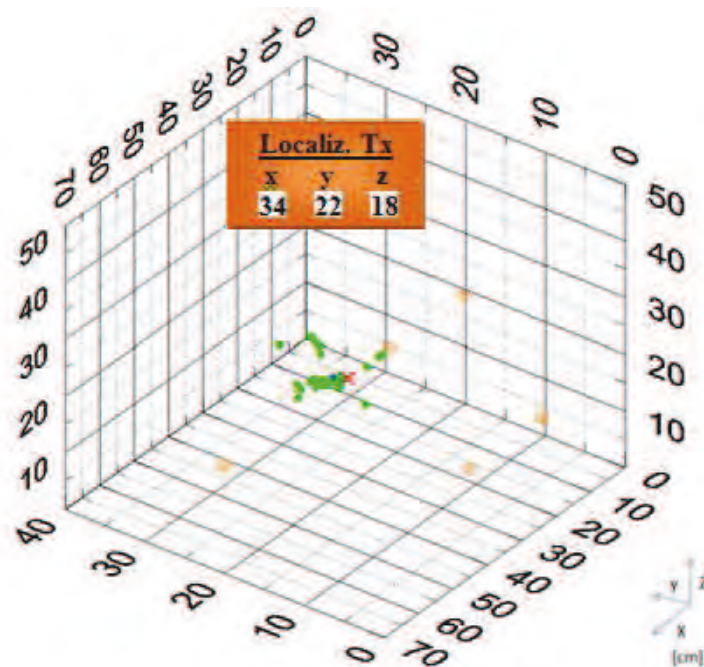
b)

Figure 14. Location results (64 Pa). Taking the OF sensor as a reference, without processing ( $SN < 3$ ) in a) and with processing ( $SN \geq 3$ ) in b).

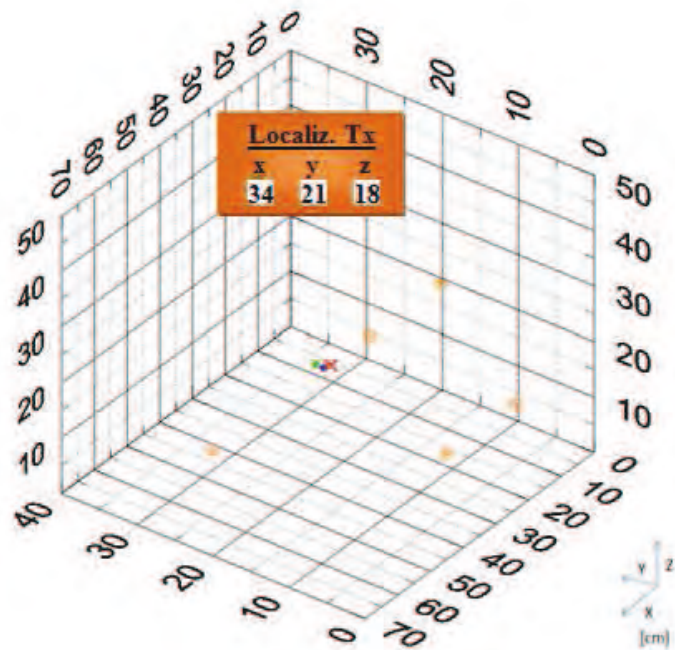
Figure 14a) shows a 3D representation of the resolved positions of the AES with 242 measures. In this case, the OF sensor is used as the time reference and the arrival times are obtained without a previous denoising processing. The circles represent solutions from minimum number of events in green to maximum number of events in blue (most probable

solution is dark blue), the orange-cubes represent sensors, the red-x represents the AES and the red box below the graphs shows the coordinates of the most repeated solution.

Compared with results in Figure 14b) (with processing), the influence of the denoising sequence is decisive as it is shown in the dispersion of the different solutions of the algorithm. This is also observed with other time reference obtained by using the RH (Figures 15a) and 15b)).



a)



b)

Figure 15. Location results (18 Pa). Taking the RH as a reference, without processing ( $SN < 3$ ) in a) and with processing ( $SN \geq 3$ ) in b).



## **6. Location architecture 1 and characterization**

### **6.1. Instrumentation system**

The instrumentation system is formed by an experimental platform and a multichannel acquisition system [49]. The experimental platform consists mainly of a container with a cubic shape, with dimensions of  $103\text{ cm} \times 63\text{ cm} \times 63\text{ cm}$ . The walls of the container are made of PMMA (polymethylmethacrylate) and have a thickness of  $1.5\text{ cm}$ . One advantage of using this material is that it allows greater coupling between the acoustic signal and the external sensors. To avoid reflections which interfere with the correct measurement of some parameters of the experiment, an acoustic absorbing material of polyurethane rubber (Apltile SF5048 of Precision Acoustics - UK) with  $5\text{ cm}$  thick fixed to the inner face of some of the tank walls has been used. The tank is filled with water up to  $37\text{ cm}$ . As a result, the internal dimensions are  $90\text{ cm} \times 55\text{ cm} \times 37\text{ cm}$ .

The PMMA is optimized for the acoustic testing and the characterization of the instrumentation system. However, some differences are anticipated when comparing with a real transformer metallic tank: (1) the attenuation of the acoustic signal coming through the wall and (2) the road to the sensor of the acoustic signal propagating inside the wall. Regarding the attenuation, the OF sensor is not affected because it is located inside. In addition, the PMMA reduces the acoustic impedance mismatch with the internal medium and therefore, the attenuation in the PMMA is much lower. To account for the additional attenuation in real conditions, tests of detection at the limit of three times the amplitude of the noise have been made. If the signal is three times the amplitude of the noise or larger, the dispersion of the TOA to each PZT is less than  $1\%$  in all sensors. If the signal is even lower but distinguishable from noise after processing, the dispersion of the TOA is less than  $10\%$ . This has been experimentally evaluated. In regard to the different paths to the sensor, again the OF sensor is not affected because it is immersed. In the case of the PZT sensors, the PMMA eliminates the alternative path through the walls because the sound propagation velocity (transversal) for PMMA ( $1378\text{ m/s}$ ) is lower than the sound propagation velocity for oil ( $1410\text{ m/s}$ ). This is different in a metallic tank, but in that case the filtering of low frequencies is able to attenuate the observation of paths through the walls.

To emulate the partial discharges a wave generator applied to a PZT ultrasonic transducer hydrophone (B&K 8103) working as emitter has been employed. The

characteristics of the ultrasonic signals that are generated by the hydrophone are similar to those of the acoustic emissions from partial discharges.

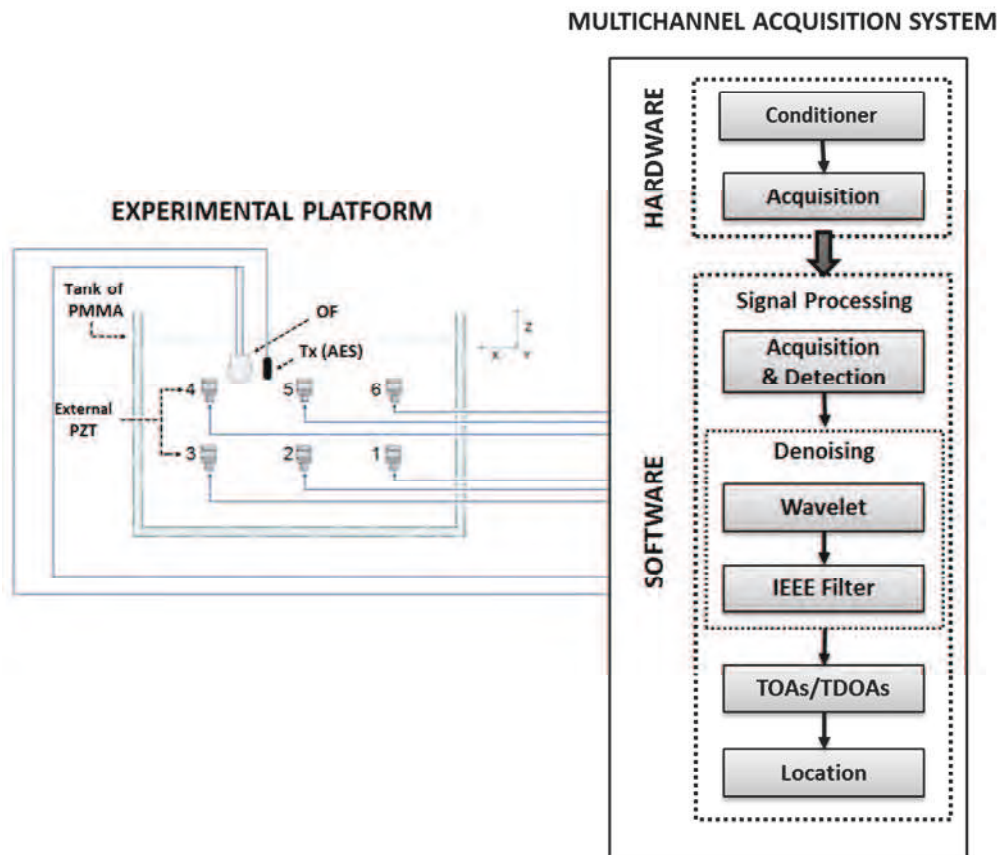


Figure 16. Multichannel instrumentation system for the detection and location of acoustic emissions of partial discharges.

Figure 16 shows the experimental scheme implemented. It is composed mainly by the tank instrumented with PZT sensors on the walls, the OF sensor inside and a multichannel measurement system. The latter has hardware of conditioning and acoustic signal acquisition, and software that provides the denoising of the acoustic signals and the location of the AES. The software follows the architecture 1. This is a single architecture that utilizes only one programming language, only one programming tool to perform all operations (LabVIEW). Figure 17 shows a block diagram of the single architecture.

## Single Architecture (LabVIEW)



Figure 17. Single architecture (LabVIEW) – Architecture 1

### 6.2. Location algorithm

The 3D location algorithm has been implemented entirely in LabVIEW and the method is based on time-differences patterns ( $\tau_{0k}^{LUT}$ ) [34]. The time-differences patterns are formed for each position in the transformer by knowing the transformer internal dimensions and they are saved as lookup tables ( $k=1..6$  lookup tables as shown in the Figure 18). The source is located by comparing the measured time-differences vector with the lookup time-differences tables.

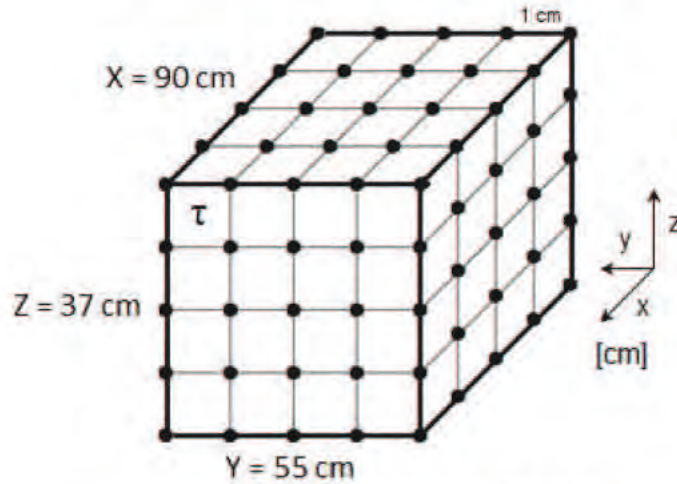


Figure 18. Model of the transformer tank (LUT 3D).

The time-differences lookup tables are calculated by subtracting (6) - (5) and solving for the time-differences ( $\tau_{0k}$ ):

$$\tau_{0k}^{LUT}(x,y,z) = \frac{\sqrt{(x-x_{PZTk})^2 + (y-y_{PZTk})^2 + (z-z_{PZTk})^2} - \sqrt{(x-x_{OF})^2 + (y-y_{OF})^2 + (z-z_{OF})^2}}{v_s}, \quad (9)$$

,  $k=1..6$

The most suitable solution is one that fulfills:

$$(x, y, z) / \min \left( \sum_{k=1}^6 \left| \tau_{0k}^{LUT}(x, y, z) - \tau_{0k} \right| \right), \quad x \in [0, 90) \quad y \in [0, 55) \quad z \in [0, 37) \quad (10)$$

where  $(x, y, z)$  is the AES site,  $\tau_{0k}$  are the measured time-differences,  $\tau_{0k}^{LUT}(x, y, z)$  are the time-differences lookup tables.

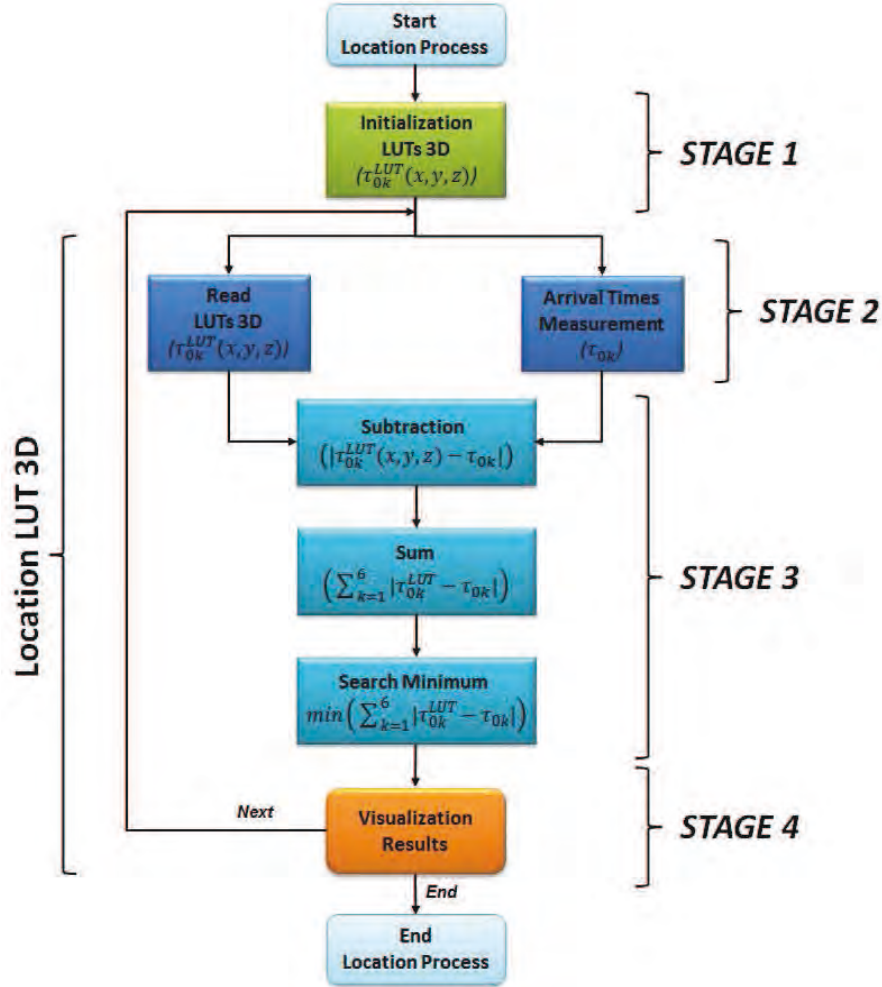


Figure 19. Model of the transformer tank (LUT 3D).

The flowchart of the location process is explained in Figure 19 and it consists of four stages. A first stage of initialization, the LUTs 3D  $(\tau_{0k}^{LUT}(x, y, z))$  are built through the equation (9) considering the speed of sound in the medium, the tank dimensions and the coordinates of the sensors. The second stage of measurement and reading, on the one hand the LUTs 3D  $(\tau_{0k}^{LUT}(x, y, z))$  are read and on the other hand the time-differences  $(\tau_{0k})$  are measured. A third stage of operation and searching, first the time deviation is calculated by subtracting the times measured to the time-differences lookup tables for each PZT sensor  $(|\tau_{0k}^{LUT}(x, y, z) - \tau_{0k}|)$ , second these matrices (tables) of time deviation are added  $(\sum_{k=1}^6 |\tau_{0k}^{LUT}(x, y, z) - \tau_{0k}|)$  and finally the minimum time deviation is searched in the sum

matrix (equation (10)). In the last stage the results of the location process are displayed and stored.

### 6.3. Setup

In this case, the experimental setup is formed by six PZT ultrasonic sensors (R15I) fixed to the outer face of one wall of the tank and an OF sensor immersed in the insulating medium. The minimum number of sensors must be four PZT sensors outside and the OF sensor inside. However, a set of two sensors per phase (six sensors) and the OF sensor is chosen considering a three phase scheme (Figure 20).

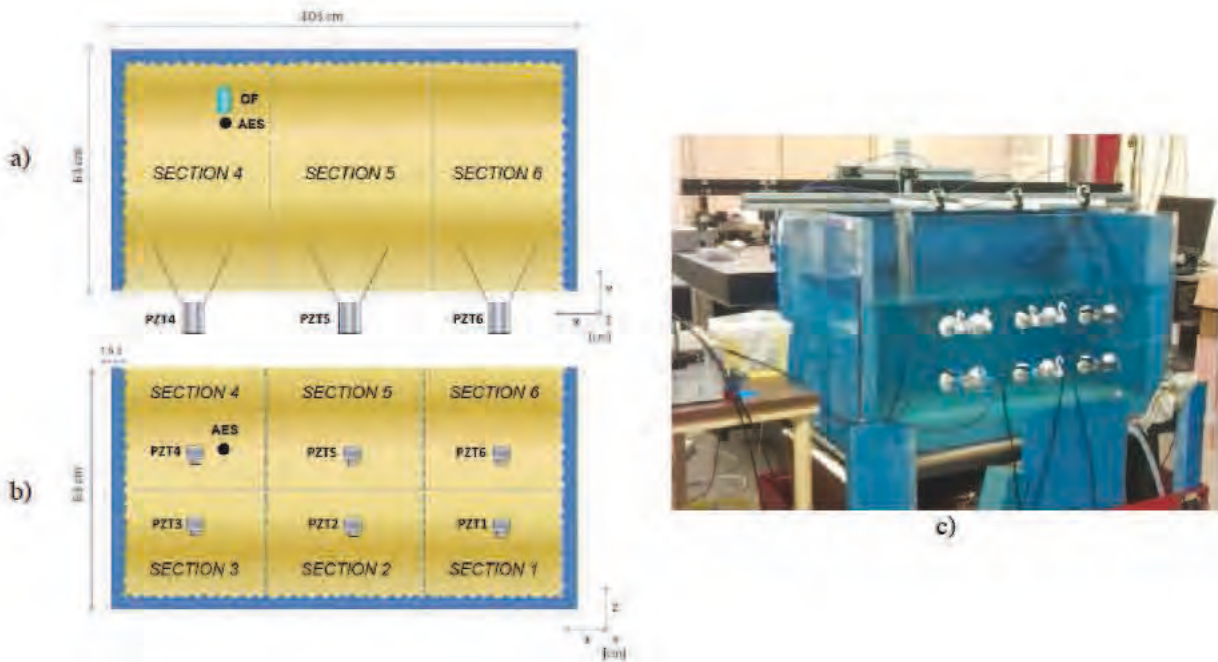


Figure 20. Experimental setup for the location of the emission source a) top view b) front view c) picture.

The positions of the sensors are shown in TABLE II.

TABLE II. POSITION OF THE SENSORS

Sensor	OF	PZT1	PZT2	PZT3	PZT4	PZT5	PZT6
Position x,y,z (cm)	66,50,26	22,0,13	44,0,13	67,0,13	67,0,24	44,0,24	22,0,24

### 6.4. Analysis of the location accuracy

The objective is to test a schematic of multiple sensors to analyze the location accuracy of acoustic emissions. With that aim the 3D location algorithm, described in Figure 19, is applied to the measured TOA of 41 acoustic emissions to each and every sensor. The

installation (as it is shown in Figures 16 and 20) was used to carry out this experiment, using an OF sensor immersed in the tank and six PZT sensors installed on the walls.

The emitter was placed at  $(X_{AES}, Y_{AES}, Z_{AES})$  and a voltage burst (150 kHz and 6 Vpk-pk) was applied to it. The 3D location algorithm was applied to the TOA from the 41 acoustic measures that are obtained for each sensor.

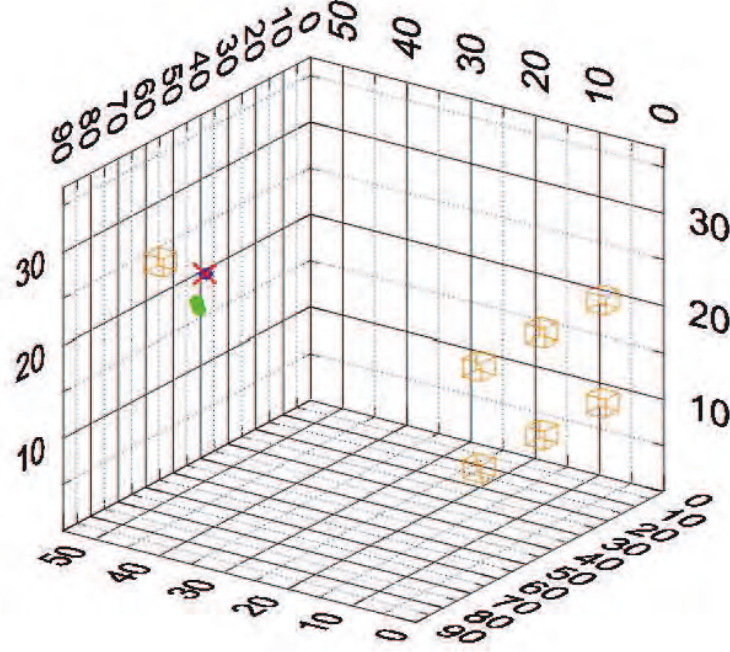


Figure 21. Location of the emission source.

Figure 21 shows the 3D representation of the resolved position of the AES that is displayed in the instrumentation system. The circles represent solutions from minimum number of events in green to maximum number of events in blue, the orange-cubes represent the sensors and the red-x represents the real position of the AES (calibrated position). As can be seen, 39 of 41 solutions resolve the same point for the location of the AES with a resolution of 1 cm. In addition, these 39 solutions match the calibrated position  $(X_{AES}, Y_{AES}, Z_{AES}) = (66, 43, 26)$ .

For a better understanding of the execution of the 3D location algorithm a 2D representation (XZ) of the matrix of time deviation ( $M(x, y = 43, z) = \sum_{k=1}^6 |\tau_{0k}^{LUT}(x, y = 43, z) - \tau_{0k}|$ ) was done by fixing the coordinate y to the real value of the AES ( $y=43$ ). It is presented in Figure 22, where the representation of the gradient to the solution is done as follows:

$$M'(x, y = 43, z) = \frac{\max(M(x, y = 43, z))}{M(x, y = 43, z)} \quad (11)$$

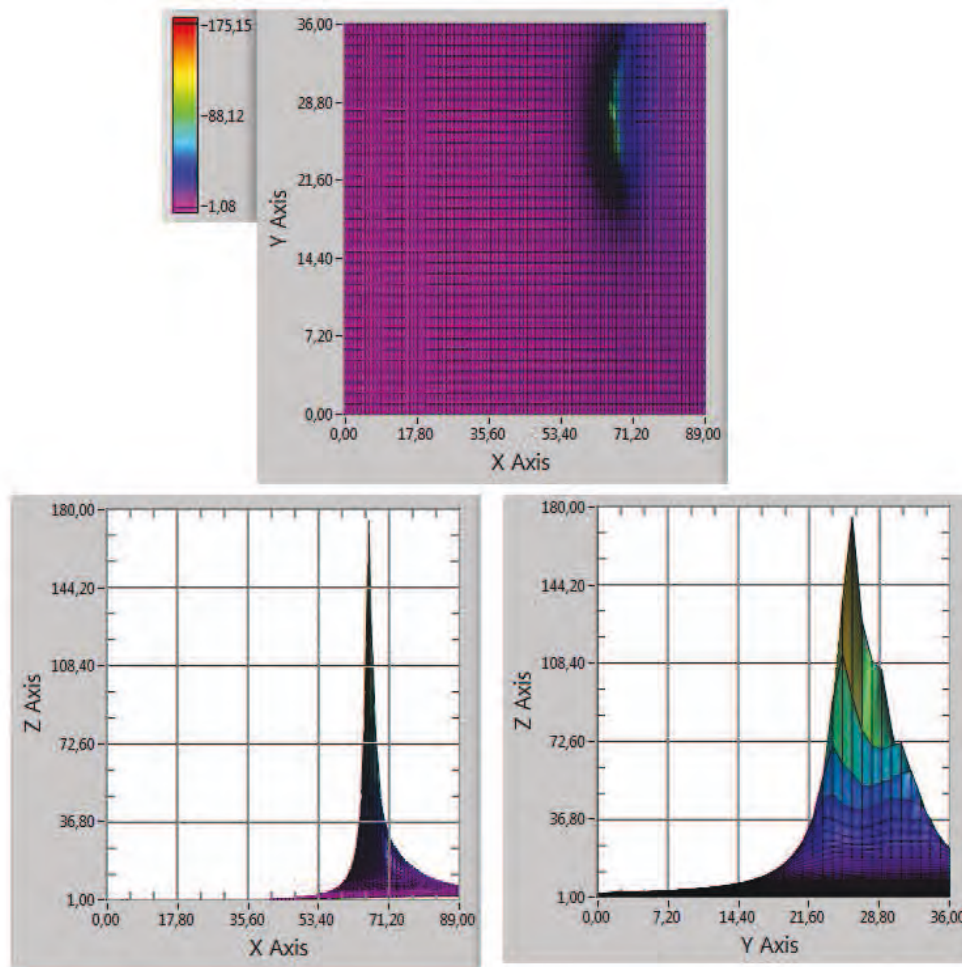


Figure 22. Location of AE based on time deviation matrix. Representation of the gradient to the solution a) 2D plot at constant value of y coordinate b) XZ projection c) YZ projection.

In the Figure 22 *X Axis* is the *x* coordinate, *Y Axis* is the *z* coordinate and *Z Axis* is the value of the matrix. It shows how the values grow when they are closer to the solution (maximum).

### 6.5. Error propagation from the times of arrival to the location algorithm

The algorithm sensitivity to errors in the TOA was evaluated. A delay of 1% of the full scale ( $3\mu s$ ) and 10% of the full scale ( $30\mu s$ ) is introduced in the TOA. The limiting error is calculated as follows:

$$Error = |E_x| + |E_y| + |E_z| = |X_{AES} - X_{SOL}| + |Y_{AES} - Y_{SOL}| + |Z_{AES} - Z_{SOL}|, [cm] \quad (12)$$

where  $X_{AES}$ ,  $Y_{AES}$  and  $Z_{AES}$  are the coordinates of the real position of the AES and  $X_{SOL}$ ,  $Y_{SOL}$  and  $Z_{SOL}$  are the coordinates of the solution of the algorithm.

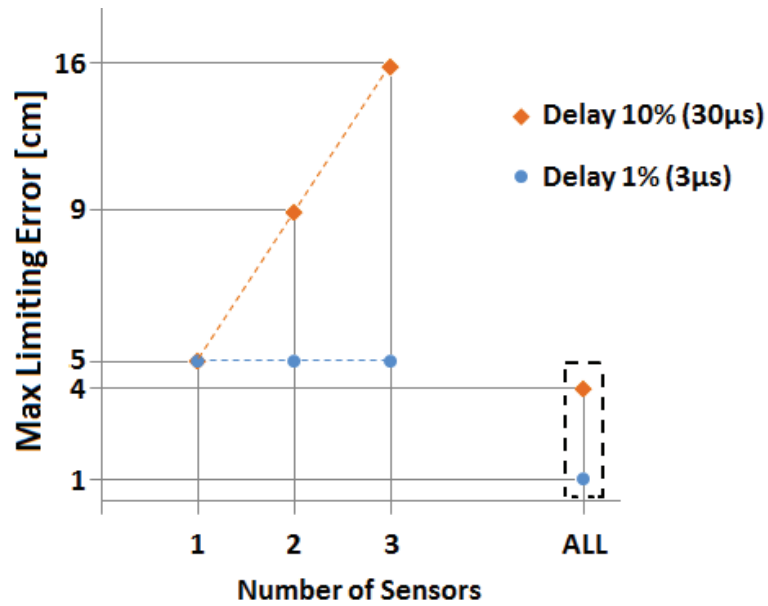


Figure 23. Representation of the maximum limiting error for a delay of 1% and 10% in one or more sensors.

Figure 23 is a representation of the maximum limiting error for a delay of 1% and 10% in one or more sensors. When the delay of 1% or 10% is introduced in the TOA of each sensor except the closest ones to the AES, the limiting error was less than 1 cm. When the sensors affected by the delay are the closest ones to AES, the limiting error increases in function of the number of sensors involved in the analyzed cause that the delay is 10%. In the particular case of a systematic error in all sensors (time zero deviation), the influence in the solution of the algorithm is smaller.

### 6.6. Influence of the number of sensors and their sites

The sensitivity of location algorithm to the number of sensors and their sites was evaluated. For that purpose, the answer of the algorithm is analyzed when one or more sensors are removed.



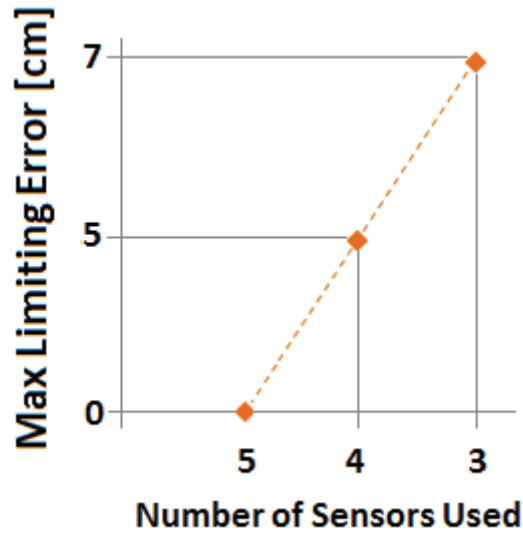


Figure 24. Representation of the maximum limiting error when one or more sensors are removed.

Figure 24 is a representation of the maximum limiting error when one or more sensors are removed. If the closest sensors to the AES are not removed the result of the location algorithm is not affected. If the closest sensors to the source are removed, the maximum limiting error is the represented one in the figure. In all cases the limiting error does not exceed 7 cm.



## **7. Measurements in conditions of high voltage direct current (HVDC)**

### **7.1. Instrumentation system**

The objective of the study of PD in HVDC conditions is to analyze the behavior of the isolates (mineral oil/pressboard) to these stimuli [2-5]. To do this, a test platform was constructed. The device under test (DUT) has a structure plane-pressboard-plane as shown in Figure 25a). This structure goes immersed in a cubic tank of mineral oil. Figure 25b) is a detail of the test setup of PD.

Due to the conditions of this experiment, the generated PD signals are very weak; hence it is very important to include highly sensitive sensors that, in addition, can be located close to the emission source. OF sensors fulfill the requirements, since they can be embedded in the insulating medium closer to the source, which allow detecting a stronger acoustic signal. The location of the OF sensor is illustrated in Figure 26.

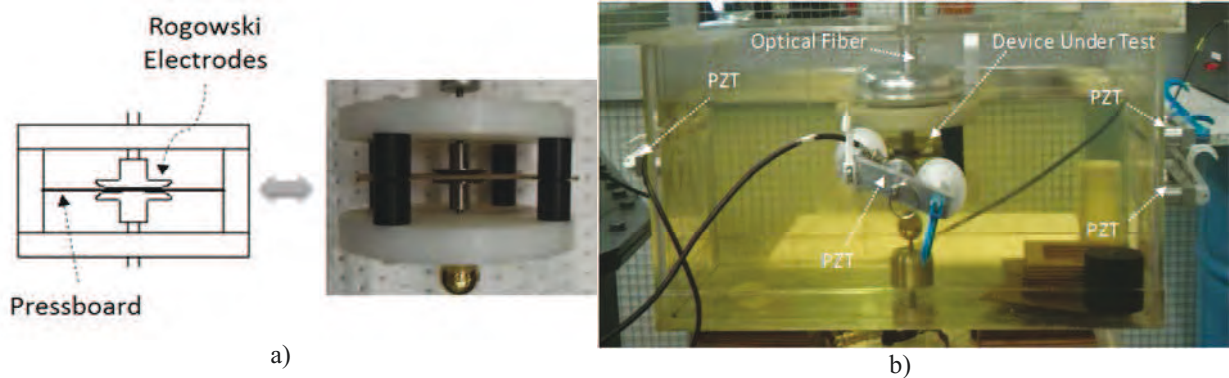


Figure 25. a) Device under test (structure: plane-pressboard-plane). b) Test platform of PD.

The instrumentation scheme for the optical fiber sensor has been designed in a previous work [14] (Figure 6).

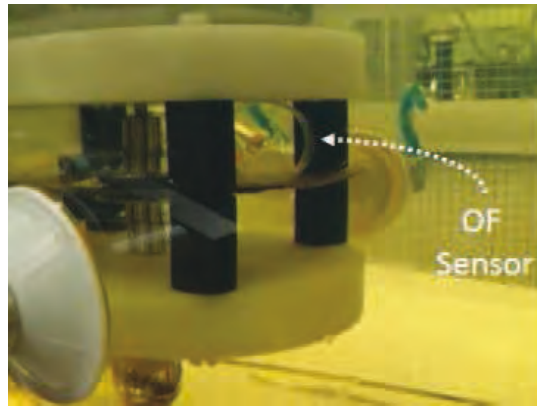


Figure 26. Location of the OF sensor.

## 7.2. Setup

The PD detection and location setup includes an acoustic part and an electrical part. The first one is constituted by a multichannel measurement system and a set of acoustic sensors. The multichannel system has conditioning and acquisition hardware and processing software (LabVIEW). In this case, four PZT ultrasonic sensors (R15i-AST) fixed to the outer face of the walls of the tank and a OF sensor inside have been used. The electrical part is formed by PD detector system (TechImp) and a laptop with detecting software (PD Base II-TechImp).

Figure 27 shows the entire system for the HVDC generation and the detection of PD. The generation setup consists of a mixed power HV transformer, DC power, an AC regulator and the DUT. This kind of transformer allows working in AC, DC and AC+DC conditions.

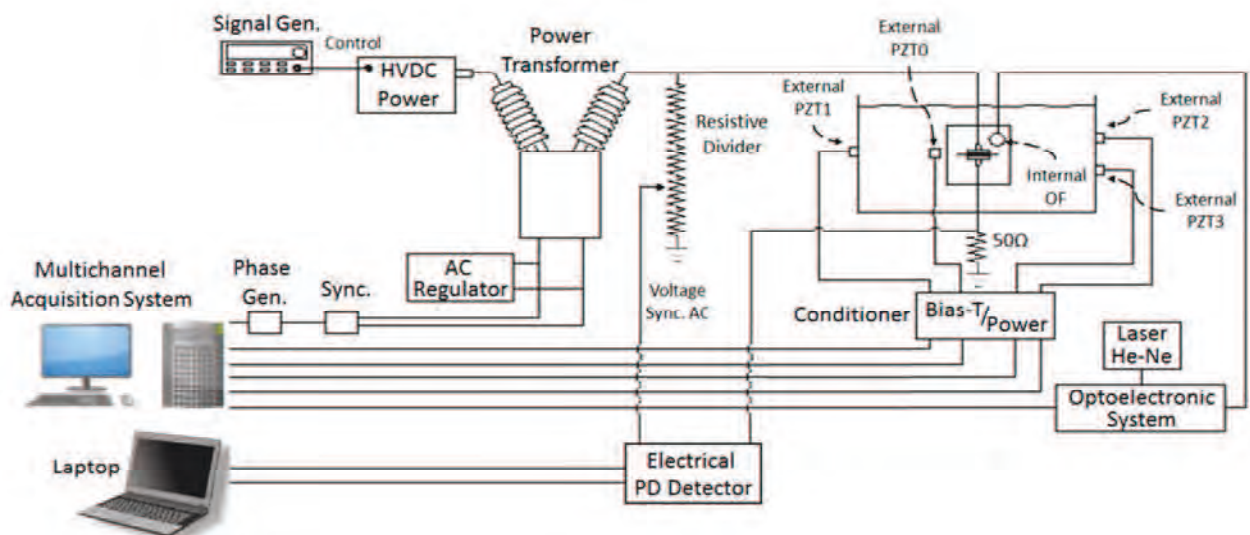


Figure 27. HVDC setup for the generation, detection and location of PD.

### 7.3. Partial discharge measurements in high voltage alternating current conditions

In this phase of the research the goal is to work in HVDC. Nevertheless, a study of acoustic detection and identification of PDs in HVAC has been performed previously, taking advantage of the mixed setup (Figure 27). For that, an acoustic PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) pattern was implemented.

To represent the PRPD pattern is necessary to have a phase reference. For this purpose a hardware has been designed that generates a ramp signal which provides the electrical grid reference as shown in Figure 28.

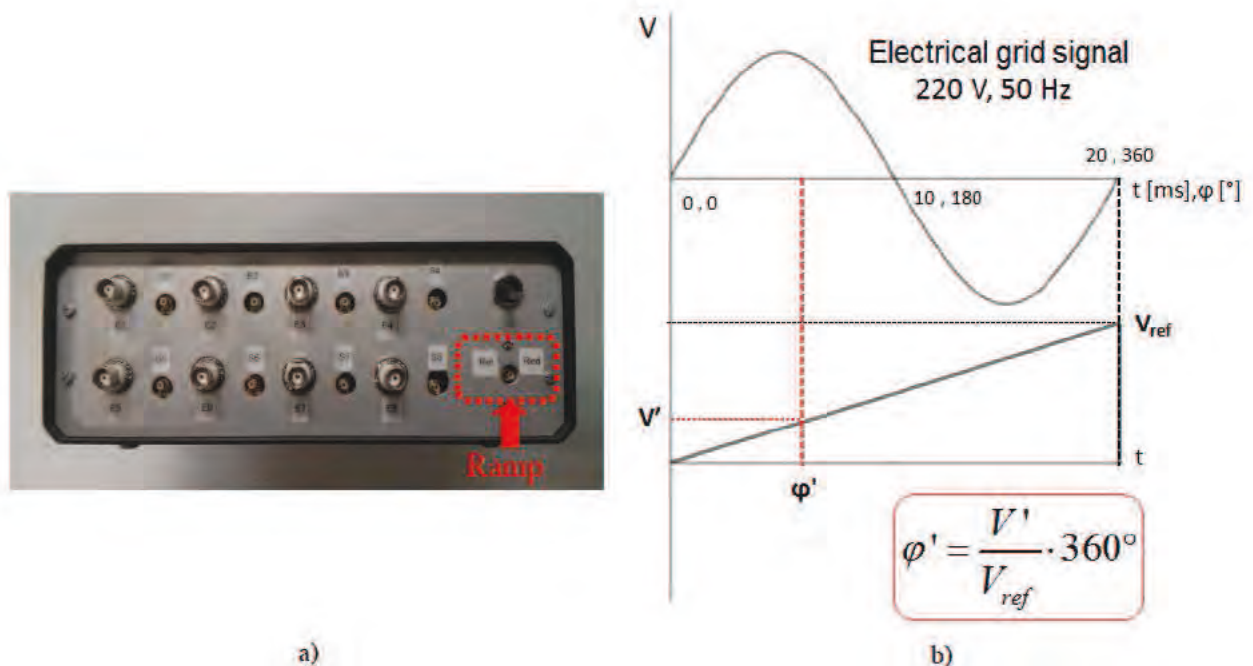


Figure 28. Ramp generator (grid reference) a), ratio ramp/grid signal b).

The required parameters to plot the pattern are: the voltage of the maximum positive peak of the PD ( $V_{PD}$ ) and the position-angle refers to the electrical grid of the maximum positive peak ( $\varphi'$ ).

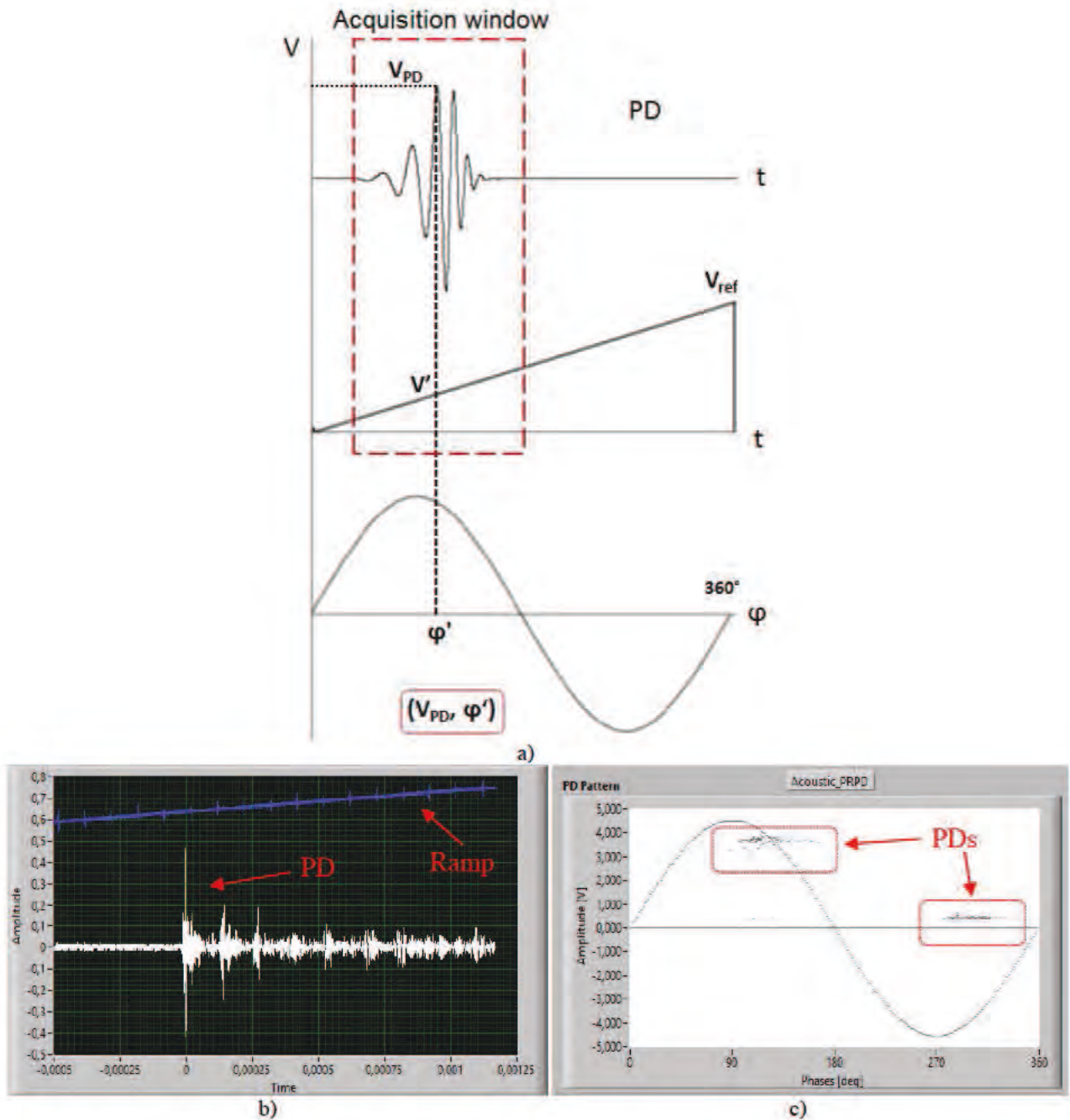


Figure 29. Parameters PRPD pattern ( $V_{PD}$ ,  $\varphi'$ ) a), PD acquisition graphic b) and acoustic PRPD pattern representation c).

The program to represent the acoustic PRPD pattern has been implemented in LabVIEW and works as follows: First the parameters of the acquired signals are extracted,  $V_{PD}$  and  $\varphi'$  (Figure 29b)), and then these values are painted in the pattern graphic (Figure 29)). The value of  $\varphi'$  has a delay associated with the arrival time of the acoustic sensors signals, but this is insignificant compared to the electrical grid cycle. Unlike with the

electrical pattern, the acoustic pattern is always positive because the characteristics of the acoustic signals in the positive cycle of electrical grid are the same as in the negative.

The result is an acoustic representation of PDs regarding to the grid phase which provides information on the type of discharge. This type of pattern until now was exclusive to the electrical detection of DPs.

#### 7.4. Partial discharge measurements in high voltage direct current conditions

In the experimental setup shown in Figure 30, PD measurements in HVDC conditions were done. However, since the inception voltage of PD is heavily dependent on the moisture of the oil and the impregnation level of the pressboard in oil, the pressboard immersed in the mineral oil was previously submitted to an extraction process of air and water by means of vacuum. The better insulation conditions as possible are achieved by these means. It is also important to highlight that the presence of the OF sensor in the DUT has not modified the inception voltage of PD.

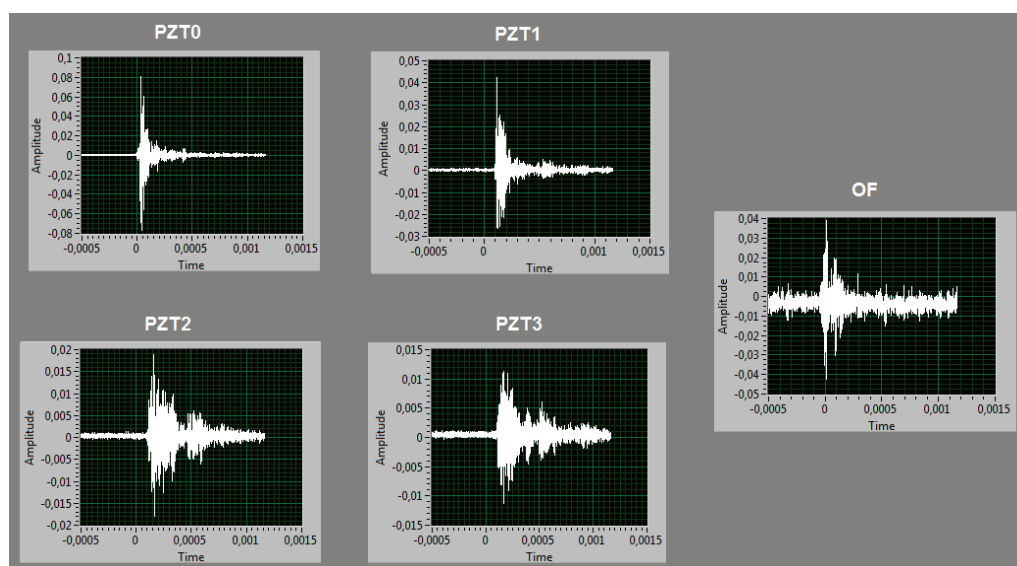


Figure 30. Results of PD measurements in HVDC conditions. [Time in s, Amplitude in V]

A comparative study of the different techniques of PD detection (electrical and acoustic) was realized, analyzing the recorded signals by each sensor as the DC voltage increased.

The OF sensor detects acoustic signals from PD over the threshold of  $2 Pa$  ( $9 mV pk$ ). Figure 30 shows a detail of the results obtained in the DP measurements where the OF sensor detected  $9 Pa$  ( $40 mV pk$ ). The response of the OF sensor was not as good as expected with

regards to acoustic PZT sensors, however it was able to detect PD where the electrical method could not. PDs were gotten around  $25\text{ kV}_{DC}$  due to the good insulation level.

In this experiment, the location algorithm of the Figure 19 was applied to the PDs detected by the acoustic sensors, but only the detected by both types. Taking the OF sensor as reference sensor, which is the closest.

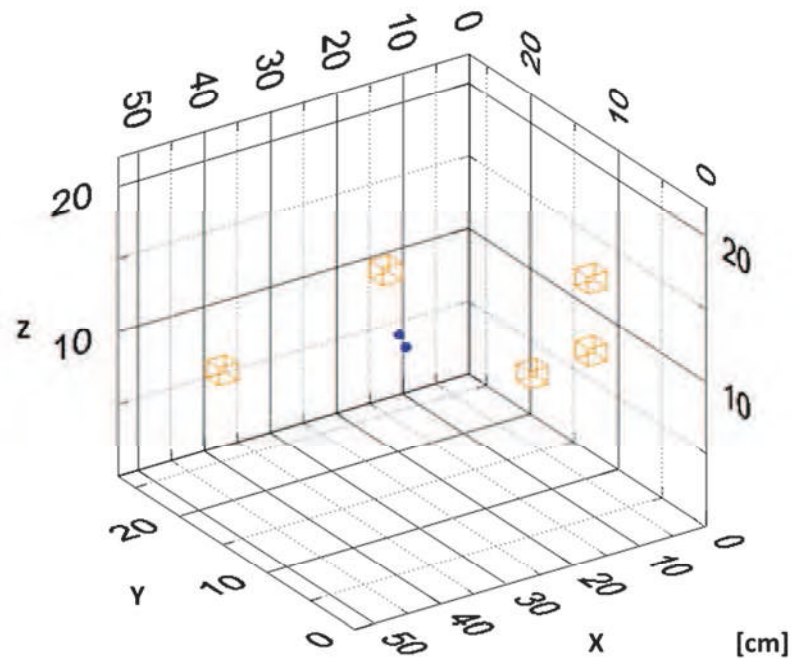


Figure 31. Results of PD location (HVDC)

Figure 31 shows the 3D representation of the solutions of the algorithm. The blue circles represent solutions and orange cubes represent the sensors. In this case, the OF sensor detected a couple of discharges, while the PZT detected some more. The location of the discharges indicates that these occur in the pressboard. This is an expected result because in DC the dielectric stress is concentrated on the pressboard, while in AC this is concentrated in the oil.



## 8. Location architecture 2 and characterization

### 8.1. Instrumentation system

The instrumentation system is constituted by an experimental platform for acoustic emission testing and a multichannel acquisition system as shown in Figure 32 [50-51]. The experimental platform consists mainly of a container of cubic shape and the following effective dimensions  $900\text{ mm} \times 550\text{ mm} \times 370\text{ mm}$ . The walls of the container are made of polymethylmethacrylate (PMMA) and they have a thickness of  $1.5\text{ cm}$ .

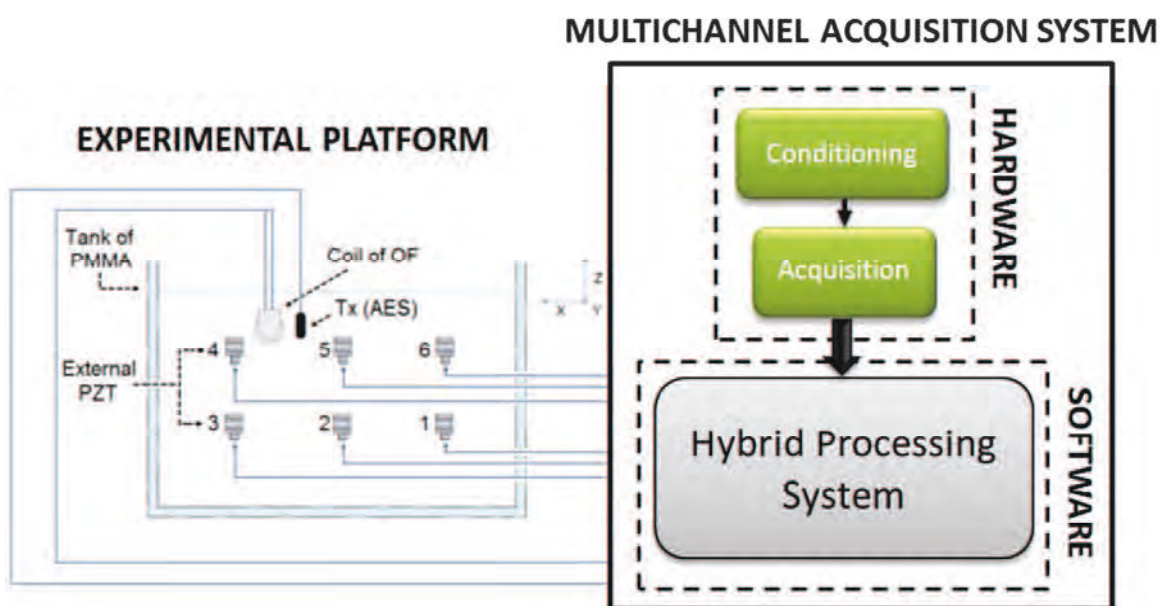


Figure 32. Experimental setup for the detection of AE and the localization of AES with a two-stage processing system – LabVIEW/Matlab.

A wave generator applied to a PZT ultrasonic transducer (hydrophone B&K 8103) has been employed as a source to generate ultrasonic acoustic emissions.

Six PZT ultrasonic sensors have been used on the surface of a wall (R15I/AST-Physical Acoustic Corporation). In addition, an optical fiber (OF) sensor has been used within the tank.

The multichannel acquisition system has a specific hardware of acoustic signal conditioning and acquisition (PXI-National Instruments), and a software block for detecting and locating the acoustic signals (hybrid processing system).

The hybrid processing system follows the architecture 2 (Figure 33). It is formed by two parts; the first one is programmed in LabVIEW and it is devoted to the detection process.

The acquisition of the acoustic signals is performed in all channels simultaneously and a signal processing of each channel is applied, which is based on digital filtering and Wavelet denoising (Figure 8).

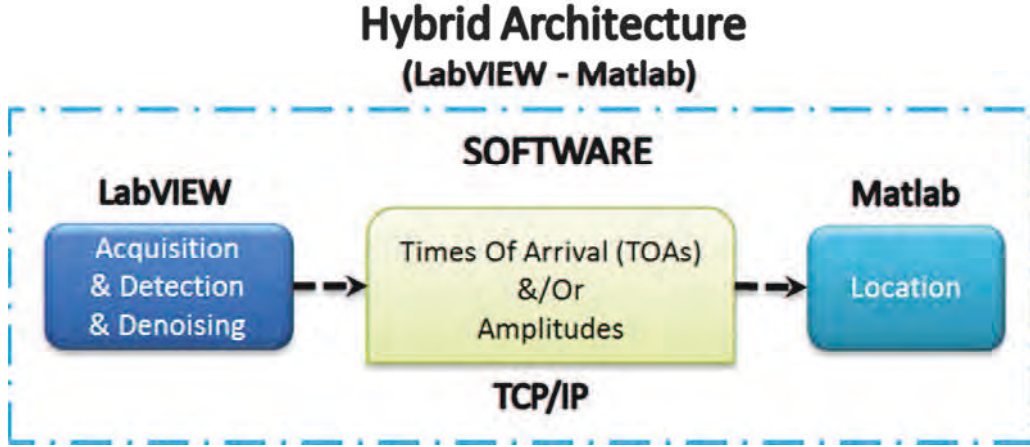


Figure 33. Hybrid architecture (LabVIEW - Matlab) – Architecture 2.

As a result of the processing, the time of arrival (TOA) is obtained by the first stage for each and every channel and each acoustic emission event. Other information can be also extracted, such as the amplitude of the AE.

The second part is programmed in Matlab and it is dedicated to locating the AES. It solves the equations system of trilateration for a 3D model of localization. The communication between both parts (from LabVIEW module to Matlab module) is mainly in terms of the information contained in the TOAs. It is performed efficiently through a packet transfer protocol. Particularly, the Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP) are used. A real-time localization of the AES is obtained by these means. In addition, remote data analysis is provided by this communications protocol.

## 8.2. Location solution strategies

In this section the different strategies for solving the localization equations system are described. In the following methods, except the PSO method [30-32], the equations system should be adapted to the matrix structure  $A*X=B$ . This is obtained in (13) by subtracting (5) from (6) for  $k=1$  to  $N$ :

$$\begin{aligned}
 &2(x_{Sk} - x_{Sref})x + 2(y_{Sk} - y_{Sref})y + 2(z_{Sk} - z_{Sref})z + 2v_s^2\tau_{0k}T = \\
 &= (x_{Sk}^2 - x_{Sref}^2) + (y_{Sk}^2 - y_{Sref}^2) + (z_{Sk}^2 - z_{Sref}^2) - v_s^2\tau_{0k}^2, \quad k=1..N
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$A = \begin{pmatrix} 2(x_{S1} - x_{Sref}) & 2(y_{S1} - y_{Sref}) & 2(z_{S1} - z_{Sref}) & 2v_s^2\tau_{01} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2(x_{SN} - x_{Sref}) & 2(y_{SN} - y_{Sref}) & 2(z_{SN} - z_{Sref}) & 2v_s^2\tau_{0N} \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ T \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} (x_{S1}^2 - x_{Sref}^2) + (y_{S1}^2 - y_{Sref}^2) + (z_{S1}^2 - z_{Sref}^2) - v_s^2\tau_{01}^2 \\ \dots \\ (x_{SN}^2 - x_{Sref}^2) + (y_{SN}^2 - y_{Sref}^2) + (z_{SN}^2 - z_{Sref}^2) - v_s^2\tau_{0N}^2 \end{pmatrix}$$

The methods used in this work have been implemented in Matlab and they are the following:

**Direct methods: Solve, LS, LN and Cramer.**

1. Solve Method: This method solves the system using the function *solve* of Matlab.
2. LS Method: The Least Squares (LS) Method solves the system using:  $X = (A^T A)^{-1} A^T B$ .
3. LN Method: The Least Norm (LN) Method uses:  $X = A^T (A A^T)^{-1} B$ .
4. Cramer Method: This method can only be used if  $\det(A) \neq 0$ , and it is:

$$A = [A_x \ A_y \ A_z \ A_T]$$

$$x = \frac{|B \ A_y \ A_z \ A_T|}{|A|}, y = \frac{|A_x \ B \ A_z \ A_T|}{|A|}, \quad (14)$$

$$z = \frac{|A_x \ A_y \ B \ A_T|}{|A|}, T = \frac{|A_x \ A_y \ A_z \ B|}{|A|}$$

**Indirect methods: INI and PSO**

5. INI Method: This Indirect Non-Iterative (INI) method [33].
6. PSO Method: The Particle Swarm Optimization (PSO) is an iterative method [30-32].

The equation system of location is rewritten in this algorithm to minimize the fitness function  $f(p)$ :

$$f(p) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left[ (px_j - x_i)^2 + (py_j - y_i)^2 + (pz_j - z_i)^2 - v_s^2 (pT_j + \tau_i)^2 \right] \quad (15)$$

where  $n$  is the number of particles,  $m$  is the number of sensors,  $\tau_i$  is the time-difference of the  $i^{th}$  sensor (in this method the reference sensor is  $i=1$ ,  $\tau_1=0$ ),  $v_s$  is the speed of the sound in the medium,  $[px_j, py_j, pz_j, pT_j]^T = p_j$  is the position of the  $j^{th}$  particle and  $[x_i, y_i, z_i]^T = s_i$  is the position of the  $i^{th}$  sensor.

A refinement of the PSO includes the following parameters: inertia weight ( $w_k$ ) and constriction coefficient ( $\gamma$ ). The equations in this case are as follows:

$$\begin{aligned} v_j(t+1) &= w_k \cdot v_j(t) + c_1 R_1 [p_j^{best}(t) - p_j(t)] + c_2 R_2 [g^{best}(t) - p_j(t)] \\ p_j(t+1) &= p_j(t) + \Upsilon \cdot v_j(t+1) \end{aligned} \quad (16)$$

where  $v_j(t) = [vx_j(t), vy_j(t), vz_j(t), vT_j(t)]^T$  is the velocity of the  $j^{th}$  particle at time  $t$ ,  $p_j(t) = [px_j(t), py_j(t), pz_j(t), pT_j(t)]^T$  is the position of the  $j^{th}$  particle at time  $t$ ,  $w_k$  is the inertia weight,  $\Upsilon$  is the constriction coefficient,  $c_1$  and  $c_2$  are factors from 1 to 4,  $R_1$  and  $R_2$  are diagonal matrices with elements from 0 to 1,  $p_j^{best}(t)$  is the best result of the  $j^{th}$  particle and  $g^{best}(t)$  is the best result of the whole group of particles.

The inertia weight ( $w_k$ ) is calculated dynamically:

$$w_k = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{N} k \quad (17)$$

where  $k$  is the current iteration,  $N$  is the number of iterations and  $[w_{\min}, w_{\max}]$  is the range of the inertia weight.

The value of the constriction coefficient ( $\Upsilon$ ) depends on the factors  $c_1$  and  $c_2$  as follows:

$$\Upsilon = \frac{2}{\left| 2 - \gamma - \sqrt{\gamma^2 - 4\gamma} \right|}, \gamma = c_1 + c_2 \text{ and } \gamma > 4 \quad (18)$$

### 8.3. Characterization of the processing system. Comparison of location algorithms

The goal is to test the hybrid system. For this, its behavior is analyzed in real conditions of AEs and the responses of different strategies for solving the localization equations system are compared.

The position of the AES is (580, 270, 260), the positions of the sensors are shown in TABLE V. This is an example in which a set of dispersed solutions is obtained. TABLE VI shows the statistical analysis of TOAs. The STD of the TOAs observed for the reference sensor 1 is about 5%.

TABLE V. POSITION OF THE SENSORS

Sensor	OF (S1)	PZT1 (S2)	PZT2 (S3)	PZT3 (S4)	PZT4 (S5)	PZT5 (S6)	PZT6 (S7)
x,y,z (mm)	580,340 ,260	220,0 ,130	440,0 ,130	670,0 ,130	670,0 ,240	440,0 ,240	220,0 ,240

TABLE VI. STATISTICAL ANALYSIS OF TOAS PER SENSOR

Sensor	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Max [ $\mu$ s]	65.3	325.2	334.5	226.0	211.5	221.5	316.0
Min [ $\mu$ s]	49.3	325.2	334.3	225.8	204.8	221.3	315.5
Mean [ $\mu$ s]	49.8	325.2	234.4	225.9	208.8	221.4	315.7
STD [ $\mu$ s]	2.483	0	0.079	0.064	3.273	0.084	0.128

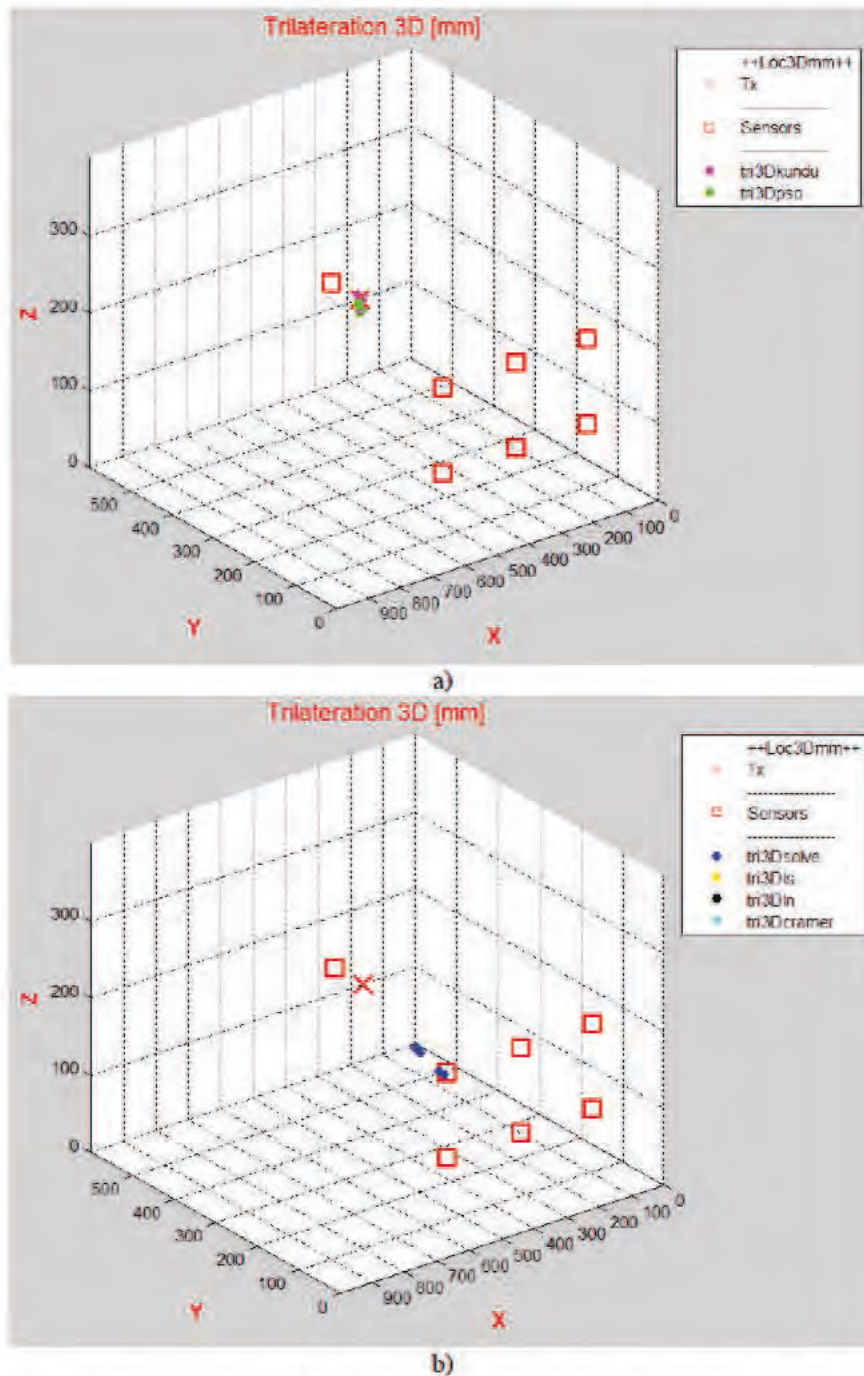


Figure 34. Results of location of the AES with dispersive solutions [mm] (41 solutions per method): a) INI and PSO; b) Solve, LS, LN and Cramer.

In this case the INI and PSO methods provides good results (Figure 34a)) but the results of Solve, LS, LN and Cramer methods show a collection of dispersed solutions, which are shifted from the right location (Figure 34b)).

The offset error is defined as the distance between the real position of the AES and the mean value of the solutions of location:

$$OffsetError = \sqrt{(x_R - x_M)^2 + (y_R - y_M)^2 + (z_R - z_M)^2} \quad (19)$$

where  $(x_R, y_R, z_R)$  are the coordinates of the real position of the AES and  $(x_M, y_M, z_M)$  are the mean value of the solutions.

The dispersion of solutions is quantified as the STD ( $\sigma$ ) of the solutions of location:

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2, \quad \sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (20)$$

where  $\sigma_x, \sigma_y$  and  $\sigma_z$  are the STD of the each axis.

The results of the dispersion and the offset error are shown in TABLE VII.

TABLE VII. LOCATION ERRORS

Methods	Solve, LS, LN, Cramer	INI	PSO
Dispersion (cm)	3,2	1,4	0,7
Offset error (cm)	15,3	1,0	1,7

TABLE VIII shows the runtimes of the different strategies of localization. All of them spend the same time except Solve and PSO that are slower.

TABLE VIII. RUNTIMES

Method	Solve	LS	LN	Cramer	INI	PSO
Time (ms)	163.7	83.1	83.5	83.3	83.7	163.2

#### 8.4. Characterization of the processing system. Analysis of the error propagation to the location of the AES

A simulation study was performed in order to evaluate what is the influence of the error in the TOAs on the accuracy of the location. For that, on the one hand, a sweep of the position within the tank was realized by moving the AES along the axis XYZ as shown in Figure 35. On the other hand, different percentages of error were added to the TOAs.

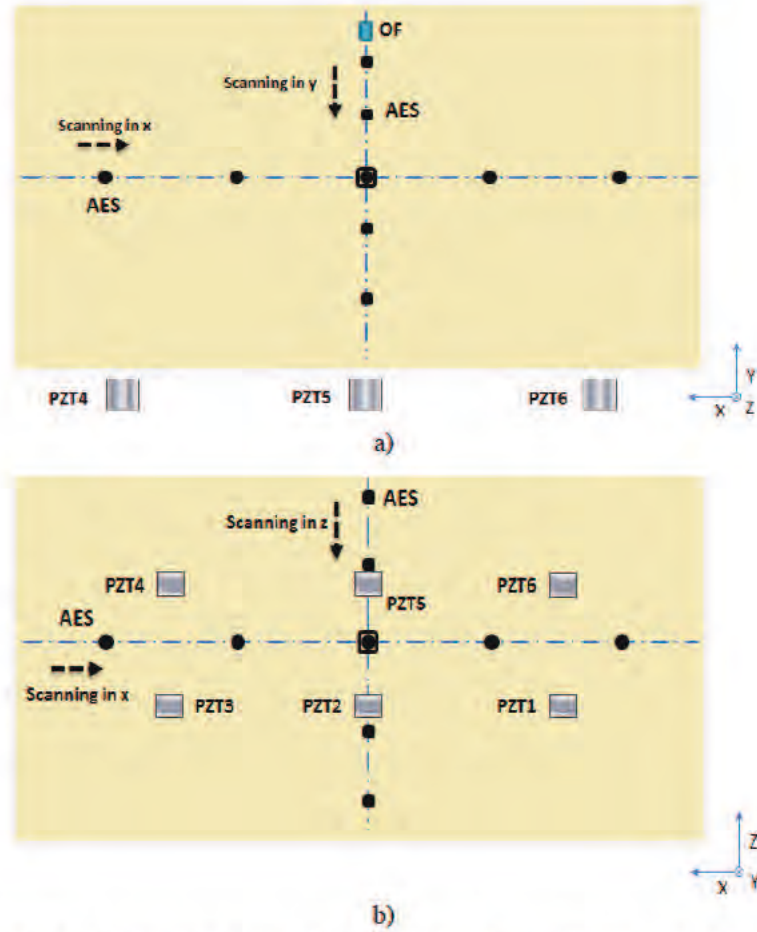


Figure 35. Sweep of the AES position within the tank, scanning XY (top view) in a) and scanning XZ (front view) in b).

The results of the PSO method are shown below, considering that it was the selected method that obtained the best response in the previous comparison.

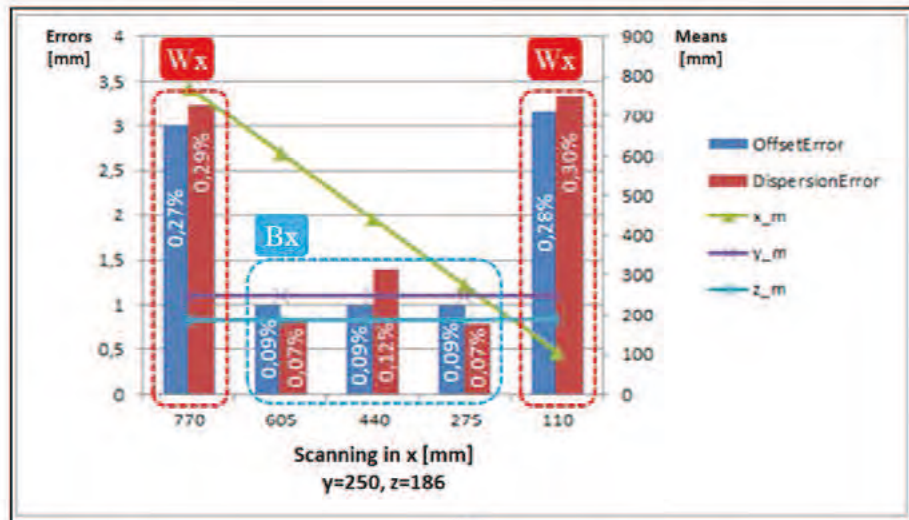
First, a random error up to 2% (standard uniform distribution –  $mean = 1\%$ ) was applied to each and every TOA. The results are shown in Figure 36. The mean solution for each coordinate, the offset error, the dispersion error and the percentage of each error are represented. This percentage is referred to the maximum distance between two points inside de tank that is the diagonal:

$$\%_{Error} = \frac{Error}{D_{Tank}} \cdot 100 \quad (21)$$

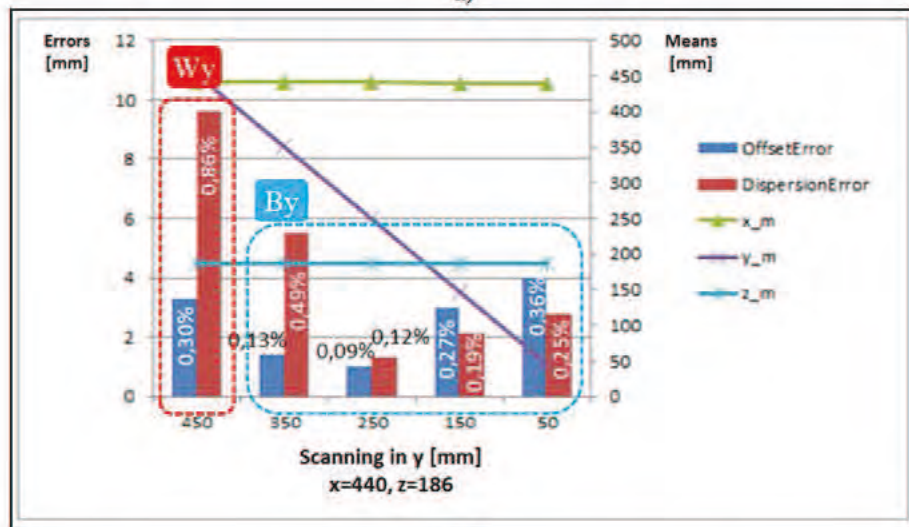
where  $D_{Tank}$  is the diagonal:

$$D_{Tank} = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = 1117'766mm \quad (22)$$

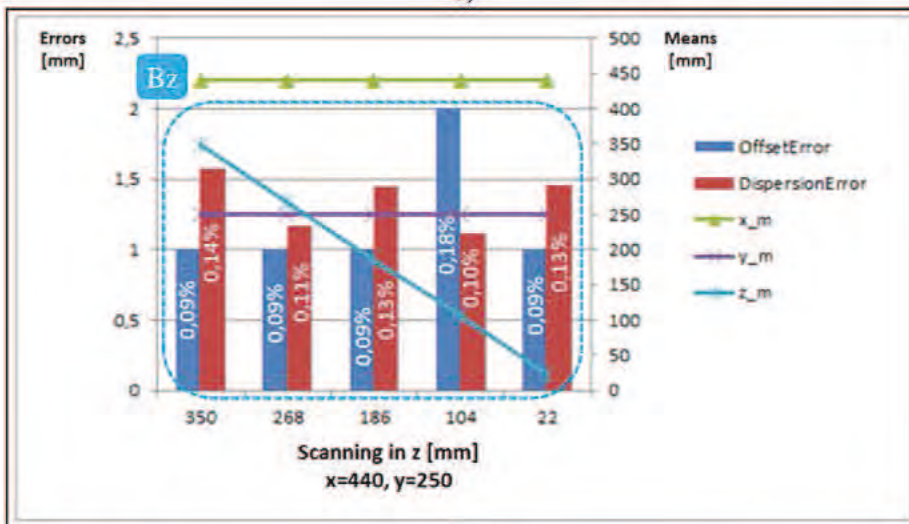
where  $(dx, dy, dz) = (900, 550, 370) mm$  are the dimensions of the tank.



a)



b)

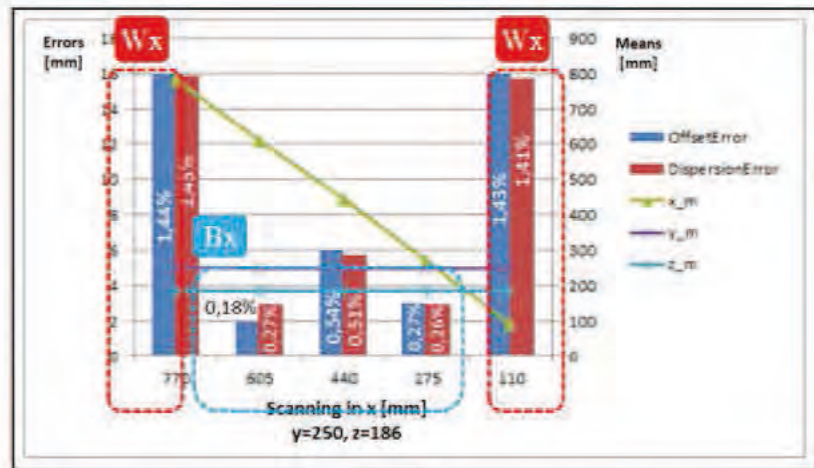


c)

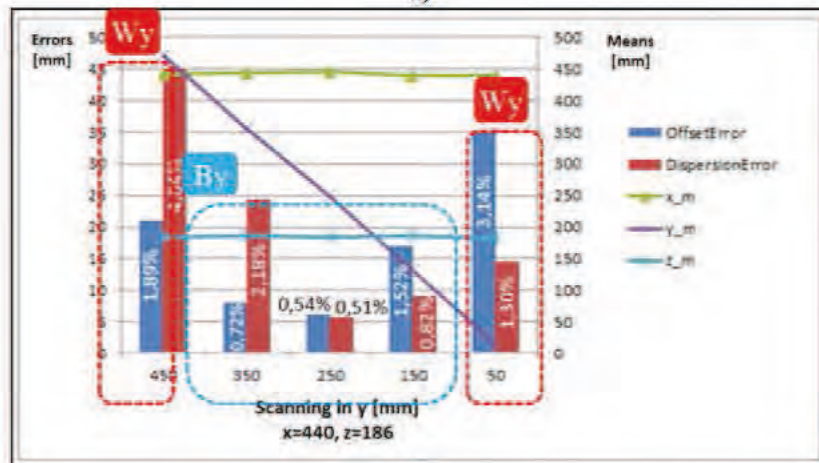
Figure 36. Results (2%) of the scanning X in a) , the scanning Y in b) and the scanning Z in c).



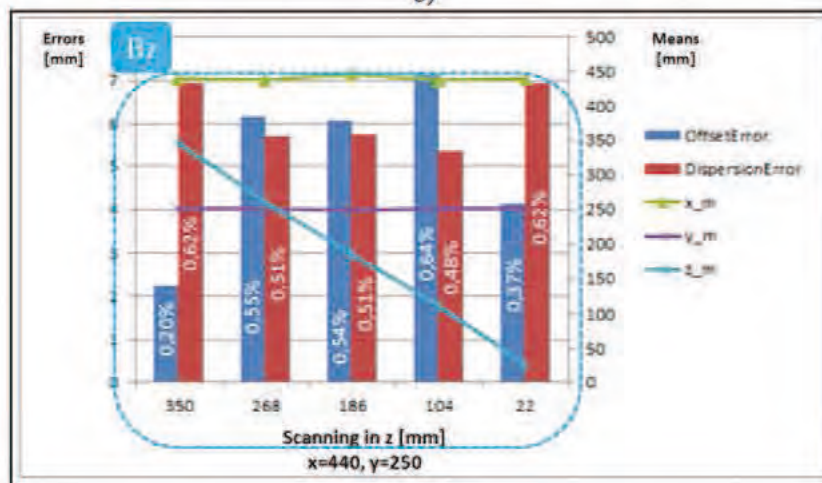
These results show different axis-dependent zones. The *Bk* areas are zones with small limited stable error and the *Wk* areas are zones in the borders that exhibit higher errors. Edge and depth effects are observed in the zone *Wx* and *Wy*, respectively. In this case, the maximum dispersion error is 9.5 mm and the maximum offset error is 4 mm (less than 1% in both cases).



a)



b)



c)

Figure 37. Results (10%) of the scanning X in a), the scanning Y in b) and the scanning Z in c).

The results are similar to the previous case except of the scale. The results of *10%* follow the same pattern as *2%* with a factor of about 5. However, in the second case, the effect of the proximity to the PZT sensors is more pronounced (Wy area). The maximum dispersion error is *4.5 cm* and the maximum offset error is *3.5 cm* (less than 5% in both cases).

# Conclusions and future work

## 9. Conclusions

This dissertation presents the research and development on a new multichannel instrumentation system for the all-acoustic localization of AE from PD on the base of detecting the ultrasounds with both internal OF sensors and external PZT sensors. It is focused on implementing the acquisition, detection and denoising of AE signals and analyzing different strategies of localization of AES. For this purpose two alternatives are proposed, they were implemented by two different architectures and characterized experimentally in tests of AE. In addition, the system was demonstrated with PDs in HVDC-AC setups, which are state-of-the-art experiments in this research field. This chapter summarizes the major achievements and conclusions during the research.

First part is focused on acquisition, denoising and detection (TOAs) of AE signals from PD. A complete system of acquisition was implemented for monitoring signals received by several acoustic sensors of different types at the same time. A signal processing sequence allows reducing the detection threshold one order of magnitude and improving the precision for determining the TOAs and, consequently, the localization of the AES. The PD denoising techniques were adapted to the acoustic signals and tested; the most useful is a combination of wavelet techniques and digital band-pass filtering (WT + BPF). In addition, a first approach for the spatial location of the AES is included (3D mesh with progressive refinement). In short, a complete tool that detects and locates AEs generated by PDs was designed and its resolution is  $1\text{ cm}$ . The statistical analysis of the TOAs of acoustic emissions to several sensors shows that the denoising system obtains significant improvement in noisy environments with

weak signals, the detection threshold can be reduced as well as the precision in the determination of the TOAs is improved.

In order to focus on the real application, a multi-channel instrumentation system for the location of PDs in power transformers was presented. It is based on the detection of the AEs from PDs in oil with several PZT and OF sensors. An all-acoustic detection and location approach has been proposed based on a time reference given by one OF sensor installed inside the tank and the TOAs to several PZT sensors installed outside the tank (two in front of each phase windings of a three phase transformer for a typical application). The signal processing includes digital denoising techniques and time-differences LUT based location algorithms implemented with virtual instrumentation (single architecture - LabVIEW). The time-differences LUT algorithm improves the ratio performance over computational cost + complexity of the previous 3D mesh with progressive refinement. In short, a complete tool that detects and locates acoustic emissions generated by partial discharges has been designed with a resolution of *1 cm*. Additionally, an analysis of the error propagation from the TOAs to the location accuracy is done, as well as the influence of the number of sensors and their sites in the 3D location algorithm. This analysis shows that the limiting error is less than *1 cm* when the sensors that are closest to the acoustic emission source are not involved.

The next step was to test the system with real signals from PDs. For that, a complete system of PD detection and localization in HVAC-DC transformers was developed, which integrates in the same system different techniques of PD detection, electrical and acoustic, and it is able to monitor signals received by several types of sensors at the same time. It is worth to mention that an OF sensor for acoustic detection of PD was also integrated in the HVAC-DC experiments and compared to other detection methods and acoustic sensors. The analysis of the recorded PD signals shows that the OF sensor provides information that helps to the assessment of the type and location of PD, not only as a consequence of its withstanding of the harsh environment, but also because it is able to detect PDs in the particular conditions of HVDC setups. It contributes to another perspective that can be decisive in determining the reliability of the electrical insulation.

With the goal of improving the performance of the global system, hybrid programming is proposed for the detection and localization of AEs. This system with hybrid architecture combines the advantages of LabVIEW for multichannel acquisition and signal denoising and the benefits of Matlab for the processing and data presentation. Both modules are connected via TCP / IP, allowing also remote operation. Different strategies for solving the location

equations with a resolution of  $1\text{ mm}$  have been implemented and compared. The PSO and INI strategies of localization were demonstrated as the most efficient in terms of computational and complexity costs versus performance. In addition, an analysis of the error propagation from the TOAs to the results of location was applied to the PSO strategy under different conditions of error magnitude and positions of the acoustic source. The edge, depth and proximity effects were clearly identified during the analysis of the location results. Even so, the maximum relative errors of location (offset and dispersion) are limited to less than the TOA relative mean errors. Results of location accuracy better than  $1\text{ cm}$  in  $1\text{ m}$  were obtained with TOA uniform ( $0\% - 2\%$ ) error distribution.

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

- The design and implementation of a multichannel instrumentation system for the detection and localization of AEs from PDs by combining PZT sensors and FO sensors in an all-acoustic location approach.
- The improvement of the detection and localization of AEs with the proposed sequence of denoising (wavelet and digital filtering).
- The implementation and characterization of a system for the detection and localization of AEs with a resolution of  $1\text{ cm}$  using a single programming architecture (LabVIEW).
- The implementation and characterization of a system for the detection and localization of AEs with a resolution of  $1\text{ mm}$  using a hybrid programming architecture (LabVIEW-Matlab).
- The validation of the system under real conditions of PDs in HVAC-DC experiments.

## **Future work**

Some issues related to the proposals reported in this dissertation can be considered as future research. The following are selected:

- The installation of the instrumentation system for long-term on-line monitoring of power transformers. An approach with external sensors is proposed for the characterization of the measuring system with transformers in service and the validation of acoustic measurements of PDs in field. In addition, it is proposed to install

at least one OF sensor inside transformers during the manufacturing process. Therefore, AE tests with both OF and PZT sensors can be incorporated to the set of factory tests.

- The integration of several techniques of PD detection (electrical, UHF, acoustic and multi-point OF sensors) in the same system in order to take advantage of the complimentary virtues of each of them. For example, electrical measurements provide the means of identifying the PD type and failure type in HVAC systems, AE and UHF are non-conventional methods of PD measurement that are becoming common for localization of PD and OF sensors are promising for continuous monitoring.
- To study architectures of acquisition for on-line processing and integration of hardware processing (FPGA/DSP) to increase the speed of computation. A first approach implements the acquisition and denoising of each sensing channel and the parallelization of these tasks for all channels. In addition, cross-correlation among the signals from an AES on several sensing channels could be explored to enable integrating localization strategies in processing hardware or improving the overall detection capability. In this case, managing the high-frequency of the ultrasound signals is a challenge.

## **10. List of Publications**

### **Core of the thesis**

#### **Journals**

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano and J. A. García-Souto. “Instrumentation System for the Location of Partial Discharges using Acoustic Detection with Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 63, No. 5, pp. 1002-1013, May 2014.

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Roman and J. A. García-Souto. “Multichannel Detection of Acoustic Emissions and Localization of the Source by using a Hybrid Programming System”. ISA Transactions, Submitted 2015.

#### **Proceedings of SPIE**

**I. Búa-Núñez**, C. G. Azcárraga-Ramos, J. E. Posada-Román and J. A. García-Souto, “Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments”, SPIE Proceedings, Vol. 9157, June 2014.

#### **IEEE conferences**

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano and J. A. García-Souto, “Multichannel Acquisition System and Denoising for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 1135-1140.

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román and J. A. García-Souto, “Two-Stage Processing System for the Detection and On-Site Localization of Acoustic Emissions”, 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC15), May 2015, pp. 1921-1926.

## **National conferences**

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Sistema de Instrumentación Multicanal para la Detección y Localización de Descargas Parciales por medio de Emisiones Acústicas con Procesado y Técnicas de Reducción de Ruido”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2012, July 2012.

**I. Búa-Núñez**, J. E. Posada-Román, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Sistema Multicanal de Medida de Emisiones Acústicas de Ultrasonidos para Transformadores Trifásicos”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2013, July 2013.

## **Others related to the thesis**

### **IEEE Conferences**

J. E. Posada-Román, J. A. García-Souto, J. Rubio-Serrano and **I. Búa-Núñez**, “Multichannel Ultrasound Instrumentation for On-line Monitoring of Power Transformers with Internal Fiber Optic Sensors”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 200-205.

J. Rubio-Serrano, J. E. Posada-Román, **I. Búa-Núñez** and J. A. García-Souto, “Comparison of processing techniques for optimizing the solid insulation diagnosis based on the detection of acoustic emissions from partial discharges”, 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD13), June 2013, pp. 129-132.

### **National Conferences**

J. E. Posada-Román, **I. Búa-Núñez**, J. Rubio-Serrano y J. A. García-Souto, “Detección de Emisiones Acústicas en Transformadores Trifásicos con Sensores Internos de Fibra Óptica”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI) 2013, July 2013.



**PÁGINAS 203-236 (pág. 225-259 del pdf). Contenido y enlaces en e-Archivo**

**Acoustic detection and localization of PD using PZT and OF sensors:**

Iago Búa Núñez; Julio E. Posada-Román; Jesús Rubio-Serrano; José A. García-Souto. *Instrumentation system for location of partial discharges using acoustic detection with piezoelectric transducers and optical fiber sensors*. **En:** IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 63(5) (2014), pp. 1002-1013

URI: <http://hdl.handle.net/10016/22324>

**Acoustic detection of PD in HVDC-AC setups:**

I. Búa-Núñez ; C. G. Azcárraga-Ramos ; J. E. Posada-Román ; J. A. Garcia-Souto. *Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments*. *Proc. SPIE* 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 91572G (June 2, 2014)

URI: <http://hdl.handle.net/10016/22346>

**Detection of AE and localization of AES by using a hybrid programming system:**

Iago Búa Núñez\*, Julio E. Posada Román and José A. Garcia-Souto. *Multichannel detection of acoustic emissions and localization of the source by using a hybrid programming system*. *Submitted to ISA Transactions* in 2015

URI: <http://hdl.handle.net/10016/22399>

# References

- [1] A. Cavallini, F. Ciani and G. Montanari, “Improved identification level for defects generating partial discharges in solid insulation systems,” Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '04), Oct. 2004, pp. 422–425.
- [2] P. Morshuis and J. J. Smit, “Partial Discharges at dc Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, pp. 328-340, Apr. 2005.
- [3] 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, Feb. 2011.
- [4] U. Piovan, “Insulation systems for HVDC transformers: present configurations, trends, challenges, solutions and open points,” Proc. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 254-257 (2013).
- [5] P. Morshuis, A. Cavallini, D. Fabiani, G. C. Montanari and C. Azcarraga, “Stress conditions in HVDC equipment and routes to in service failure,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 1, pp. 81-91, Feb. 2015.
- [6] L.E Lundgaard, “Partial Discharge XIII, Acoustic Partial Discharge Detection-Fundamental Considerations”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp. 25-31, Jul./Aug. 1992.
- [7] L.E Lundgaard, “Partial Discharge XIV, Acoustic Partial Discharge Detection-Practical Application”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, pp. 34-43, Sep./Oct. 1992.
- [8] P.M. Eleftherion, “Partial Discharge XXI, Acoustic Emission-Based PD Source Location In Transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 6, pp. 22-26, Nov./Dec. 1995.

- [9] “IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-immersed Power transformers and Reactors”, IEEE Standard C57.127, 2007.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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*, Vol. 12, No. 4, pp. 4793–4802, Apr. 2012.
- [15] AMSY-6 of Vallen Systeme [Online]. Available: <http://www.vallen.de/products/multi-channel-systems>.
- [16] PowerPAC of Physical Acoustics [Online]. Available: <http://www.physicalacoustics.com/by-product/powerpac>.
- [17] LAN-XI of Brüel & Kjær [Online]. Available: <http://www.bksv.com/Products/frontends/lanxi>.
- [18] PXI of National Instruments [Online]. Available: <http://www.ni.com/pxi/esa/>.
- [19] L. Yongfen, X. Xiaohu, D. Fei, T. Xiao, and L. Yanming, ”Comparison of DOA Algorithms Applied to Ultrasonic Arrays for PD Location in Oil”, *IEEE Sensors J.*, Vol. 15, No. 4, pp. 2316 – 2323, Apr. 2015.
- [20] Q. Xie, X. Liu, J. Tao, T. Li, S. Cheng and F. Lu, “Experimental verification of the sparse design of a square partial discharge acoustic emission array sensor”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 26, 045101 (15pp), 2015.

- [21] L. Song , K. L. Cooper , Z. Wang , A. Wang and Y. Liu. “Position location of partial discharges in power transformers using fiber acoustic sensor arrays”. *Opt. Eng.*, Vol. 45, No. 11, 114401, Nov. 2006.
- [22] 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”, *Measurement Science and Technology (MST)*, Vol. 24, No. 9, pp. 1-9, Jul. 2013.
- [23] P. Kundu, N.K. Kishore and A.K. Sinha, "Identification of two simultaneous partial discharge sources in an oil-pressboard insulation system using acoustic emission techniques", *Applied Acoustics*, Vol. 73, pp. 395-401, Apr.2012.
- [24] 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, No. 3, pp. 1663-1673, Jun. 2015.
- [25] S. Sriram et al, "Signal Denoising Techniques for Partial Discharge Measurements", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol 12, No. 6, pp. 1182-1191, Dec. 2005.
- [26] I. Bua-Nuñez, “Instrumentation System for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions with Processing and Denoising”, MSc Thesis Sep. 2012.
- [27] S. M. Markalous, S. Tenbohlen and K. Feser. “Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol.15, No. 6, pp. 1576-1583, Dec. 2008.
- [28] Gergely Vakulya and Gyula Simon. “Fast Adaptive Acoustic Localization for Sensor Networks”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 5, pp. 1820-1829, May. 2011.
- [29] J. Ramírez- Niño and A. Pascacio, “Acoustic measuring of partial discharge in power transformers”, *Measurement Science and Technology (MST)*, Vol. 20, No. 11, Nov. 2009.
- [30] S. E. U. Lima, O. Frazao, R. G. Farias, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, V. Miranda and J. L. Santos. “Acoustic Source Location of Partial Discharges in Transformers”. *Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors - Proceedings of SPIE*, Vol. 7653, Sep. 2010.

- [31] L. Tang, R. Luo, M. Deng and J. Su. "Study of Partial Discharge Localization using Ultrasonics in Power Transformer based on Particle Swarm Optimization", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 2, pp. 492–495, Apr. 2008.
- [32] H. R. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach, M. Zanjani and K. Miralikhani. "A novel method for ultra-high-frequency partial discharge localization in power transformers using the particle swarm optimization algorithm". IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 29, No. 2, pp. 26-39, Mar. 2013.
- [33] Prasanta Kundu, N.K. Kishore, A.K. Sinha. "A non-iterative partial discharge source location method for transformers employing acoustic emission techniques". Applied Acoustics, Vol. 70, No. 11-12, pp. 1378–1383, Dec. 2009.
- [34] Y. Lu, X. Tan, X. Hu. "PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer". IEE Proc.-Sci. Meas. Technol, Vol. 147, No. 2, pp. 81–85, Mar. 2000.
- [35] "High-voltage test techniques – Partial discharge measurements", International Standard IEC 60270, 2000.
- [36] R. Bartnikas, "Detection of Partial Discharges (Corona) in Electrical Apparatus", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 1, pp. 111-124, Feb. 1990.
- [37] T. Boczar & D. Zmarzly, "Application of Wavelet Analysis to Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 3, pp. 433-449, Jun. 2004.
- [38] S.N. Hettiwatte, Z.D. Wang and P.A. Crossley, "Investigation of propagation of partial discharges in power transformers and techniques for locating the discharge", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 152, No. 1, pp. 25-30, Jan. 2005.
- [39] T. K. Abdel-Galil, R. M. Sharkawy, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, "Partial Discharge Pattern Classification Using the Fuzzy Decision Tree Approach", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (TIM), Vol. 54, No. 6, pp. 2258-2263, Dec. 2005.
- [40] M. Chiampi, G. Crotti, Y. Hu, and A. Sardi, "Development and Application of a Programmable Partial Discharge Calibrator", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (TIM), Vol. 58, No. 4, pp. 768-774, Apr. 2009.
- [41] G. Robles, J. M. Martínez-Tarifa, M. V. Rojas-Moreno and J. Sanz-Feito, "Inductive Sensor for Measuring High Frequency Partial Discharges Within Electrical Insulation",

- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (TIM), Vol. 58, No. 11, pp. 3907-3913, Nov. 2009.
- [42] M. V. Rojas-Moreno, G. Robles, B. Tellini, C. Zappacosta, J. M. Martínez-Tarifa and J. Sanz-Feito, “Study of an Inductive Sensor for Measuring High Frequency Current Pulses”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (TIM), Vol. 60, No. 5, pp. 1893-1900, May 2011.
- [43] G. Robles, M. Sánchez-Fernández, R. Albarracín Sánchez, M. V. Rojas-Moreno, E. Rajo-Iglesias and J. M. Martínez-Tarifa, “Antenna Parametrization for the Detection of Partial Discharges”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (TIM), Vol. 62, No. 5, pp. 932-941, May 2013.
- [44] R. A. Hooshmand, M. Parastegari and M. Yazdanpanah, “Simultaneous location of two partial discharge sources in power transformers based on acoustic emission using the modified binary partial swarm optimisation algorithm”, IET Sci. Meas. Technol, Vol. 7, No. 2, pp. 119–127, Mar. 2013.
- [45] W. Sikorski, K. Siodl, H. Moranda and W. Ziomek, “Location of Partial Discharge Sources in Power Transformers Based on Advanced Auscultatory Technique”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (TDEI), Vol. 19, No. 6, pp. 1948-1956, Dec. 2012.
- [46] J. Rubio-Serrano, M. V. Rojas-Moreno, J. Posada1, J. M. 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (TDEI), Vol. 19, No. 5, pp. 1569-1578, Oct. 2012.
- [47] J. Rubio-Serrano, J. Posada-Roman, I. Bua-Nuñez and J. A. Garcia-Souto, “Comparison of Processing Techniques for Optimizing the Diagnosis of Solid Insulation based on Acoustic Emissions from Partial Discharges”, IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), Jun. 2013, pp. 129-132.
- [48] I. Bua-Nuñez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano and J. A. Garcia-Souto, “Multichannel Acquisition System and Denoising for the Detection and Location of Partial Discharges using Acoustic Emissions”, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC13), May 2013, pp. 1135-1140.
- [49] I. Bua-Nuñez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano and J. A. Garcia-Souto. “Instrumentation System for the Location of Partial Discharges using Acoustic Detection with Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors”. IEEE

Transactions on Instrumentation and Measurements, Vol. 63, No. 5, pp. 1002-1013, May 2014.

- [50] I. Bua-Nuñez, J. E. Posada-Roman and J. A. Garcia-Souto, “Two-Stage Processing System for the Detection and On-Site Localization of Acoustic Emissions”, 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC15) , May 2015, pp. 1921-1926.
- [51] I. Bua-Nuñez, J. E Posada-Roman and J. A. Garcia-Souto. “Multichannel Detection of Acoustic Emissions and Localization of the Source by using a Hybrid Programming System”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, Submitted 2015.