



TESIS DOCTORAL

Monitorización de la Actividad de Descargas Parciales en Sistemas Aislantes Papel-Aceite mediante la Detección y Análisis de sus Emisiones Acústicas

Autor:

Jesús Rubio Serrano

Director:

José Antonio García Souto

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Leganés, Septiembre de 2017



TESIS DOCTORAL

MONITORIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE DESCARGAS PARCIALES EN SISTEMAS AISLANTES PAPEL-ACEITE MEDIANTE LA DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE SUS EMISIONES ACÚSTICAS

Autor: *Jesús Rubio Serrano*

Director: **José Antonio García Souto**

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: Javier Sanz Feito

Vocal: Miguel Ángel Sánchez-Urán González

Secretario: Fernando Machado Domínguez

Calificación:

Leganés, 5 de Septiembre de 2017

Agradecimientos

“Si quieres ir rápido camina solo, si quieres llegar lejos ve acompañado”

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi director, José Antonio García Souto, por tu acertada dirección y por tu dedicación. Gracias a tus conocimientos y a tu enfoque de los problemas hemos conseguido que esta tesis llegue a buen puerto.

Quiero dar también las gracias a Horacio Lamela por haberme acogido en tu *Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser (GOTL)* y haberme dado la oportunidad de acercarme al mundo de la investigación arropado por un gran equipo.

Muchas gracias a Daniel C. Gallego Cabo, ha sido un auténtico placer conocerte y haber podido compartir contigo estos años de trabajo y amistad. Los dos sabemos que tu apoyo ha sido clave para que esta tesis fuera posible.

Gracias a los amigos con los que he compartido mi día a día en estos maravillosos años universitarios; especialmente a Guillermo Guarnizo, Carlos Macía, Julio Posada y David Barrios, cuando miro hacia atrás, siempre formáis parte de mis mejores recuerdos.

Agradezco también a los amigos del *Grupo de Diagnóstico de Máquinas Eléctricas y Materiales Aislantes (DIAMAT)*: a Juan Manuel Martínez Tarifa, a Guillermo Robles, a la señorita Mónica Victoria, a Ángel M. Gómez y a Javier Sanz, la posibilidad de trabajar y compartir experiencias con vosotros. A vuestro lado he disfrutado y he aprendido mucho generando y midiendo descargas parciales.

AGRADECIMIENTOS

No puedo dejar de agradecer tampoco a todos aquellos amigos que conocí en mi estancia en Bolonia. Muchas gracias a mi tutor, Andrea Cavallini, a Carlos Azcárraga, a Dávide Fabiani y a Fabio Ciani. Los tres meses que estuve viviendo y trabajando con vosotros han sido una de las épocas más especiales de mi vida.

Y por supuesto, quiero daros las gracias a todos los amigos y compañeros del departamento con los que he compartido tantas cosas (perdonad a mi pobre memoria si no estáis todos los que sois): Cristina, Pablo, César, Rui, Vincent, María, Juan Carlos, Pedro, David, Manu, Rodrigo, Robinson, Jorge, Iago...

No puedo pasar por alto dar las gracias a las personas cuya generosidad sin límites han hecho este proyecto posible. A Jesús y a Patricia, grandes padres y grandes abuelos. Y a Rafa y a Lolo, hermanos e inspiradores de mi vocación por la investigación.

Y, por último, quiero dar las gracias a mi presente y a mi futuro, a Verónica y a Sergio y a Lucas. Gracias a vosotros nunca me he sentido solo incluso en las horas más oscuras. Vosotros sois mi motor y mi vida, mi legado.

Resumen

Los sistemas aislantes papel-aceite son una parte crítica en el diseño y en el correcto funcionamiento de los transformadores de potencia. Debido a las condiciones de operación del transformador, el sistema aislante está sometido a un estrés continuo, provocando una degradación constante en el mismo hasta su fallo. Para diagnosticar con la suficiente antelación la aparición de daño en el aislante y anticipar el fallo del transformador es necesario monitorizar un fenómeno que esté asociado a la degradación del sistema aislante. En este sentido, las descargas parciales (DP) han demostrado que son un marcador fiable del envejecimiento del aislante, ya que son a su vez síntoma y causa de dicho envejecimiento.

Las DP son un fenómeno físico complejo que consiste en descargas eléctricas localizadas causadas por la ruptura parcial del medio aislante bajo la influencia de la tensión del campo eléctrico local. Se manifiestan como pulsos de corriente extremadamente rápidos (duración menor que $1 \mu\text{s}$) y de baja magnitud (menor que 10000 pC). Son además un proceso estocástico, por lo que una DP no es significativa de la presencia de un fallo en el aislante, y es necesario un acercamiento estadístico sobre un conjunto de medidas de DP.

La monitorización de DP se puede realizar por procedimientos eléctricos (corrientes inducidas) y acústicos (impulsos de ultrasonidos), los cuales resultan ser complementarios. De la medida eléctrica, además de la posible identificación del tipo de

descargas, se obtiene una referencia de tiempos cero para calcular el tiempo de vuelo de las señales acústicas detectadas, permitiendo con ello la localización del origen de la DP.

El objetivo del presente trabajo es monitorizar DP a través de sus emisiones acústicas, utilizando como referencia de tiempos la señal eléctrica, para obtener información relacionada con el grado de envejecimiento del aislante.

Para alcanzar este objetivo se han marcado cuatro hitos principales. El primero consiste en diseñar una plataforma de ensayo que permita generar y estudiar distintos tipos de descargas parciales. Con este estudio se pretende caracterizar sus señales eléctricas y las emisiones acústicas asociadas, así como conocer los efectos producidos sobre el aislante por la presencia de distintos tipos de descargas.

El segundo hito está relacionado con la dificultad para detectar e identificar las emisiones acústicas de DP debido a la atenuación y a la degradación. Por ello se presentan varias técnicas de procesamiento que permiten analizar las señales acústicas y eléctricas de las DP. Posteriormente, se caracteriza la respuesta de cada técnica mediante una simulación creada específicamente para ese fin.

El tercer hito es el diseño y programación de un algoritmo en Matlab[®] que permite la monitorización de la actividad de DP con distintos tipos de sensores.

Por último, el cuarto hito consiste en aplicar el sistema de monitorización a un problema real y conocido dentro de la plataforma de ensayo y estudiar su viabilidad para utilizarlo en entornos más complejos.

Palabras clave: Descargas parciales, detección acústica y eléctrica, monitorización, procesamiento de la señal, patrones, localización, actividad de descargas parciales.

Abstract

Paper-oil insulation systems are a critical part of the design and operation of power transformers. Due to the operating conditions of the transformer, the insulation system is subjected to a continuous stress, causing a constant degradation in it until its failure. To diagnose the existence of damage in the insulation and anticipate the failure of the transformer, it is necessary to monitor a phenomenon that is associated with the degradation of the insulation system. In this sense, partial discharges (PD) have shown that they are a reliable marker of the aging of the insulation, since they are a symptom and a cause of this aging.

PD are a complex physical phenomenon consisting of a localized electric discharge caused by the partial break of the insulation medium under the influence of local electric field voltage. They appear as an extremely fast current pulse (duration below 1 μ s) and low magnitude (charge below 10000 pC). They are also a stochastic process, so a PD is not significant of the presence of a failure in the insulation, and a statistical approach of a set of PD measurements is necessary.

PD monitoring can be performed by electrical (induced currents) and acoustic (ultrasonic pulses) procedures, which are complementary. From the electrical measurement, besides the possibility of PD identification, a zero-time reference is obtained to calculate the flight time of the detected acoustic signals, allowing the location of the origin of the PD.

ABSTRACT

The objective of the present work is to monitor PD through its acoustic emissions, using as a zero-time reference the electrical signal, to obtain information on the degree of aging of the insulation.

To reach this objective four key milestones have been marked. The first one is the design of a test bench to generate and study different types of PD. From this study, it is expected to characterize its associated electrical and acoustic emissions, as well as knowing the effects produced by the presence of different types of PD in the insulation.

The second milestone is related to the difficulty in detecting and identifying acoustic PD emissions due to the attenuation and the degradation. Therefore, several signal processing techniques are presented which allow the analysis of the acoustic and electrical signals of PD. Subsequently, the response of each technique is characterized, through a simulation created expressly for that purpose.

The third milestone is the design and the programming of an algorithm in Matlab[®] that allows the monitoring of PD activity with different kind of sensors.

Finally, the fourth milestone consists of applying the monitoring system to a real and known problem within the test bench and study its feasibility for use in more complex environments.

Keywords: Partial discharges, electrical and acoustic detection, monitorization, signal-processing, pattern, location, activity of partial discharges.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	6
1.3 Estructura de la memoria	7
1.4 Marco de investigación y colaboraciones	8
2. ESTADO DEL ARTE EN LA DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES.....	11
2.1 Introducción	11
2.2 Descargas parciales en sistemas aislantes papel-aceite en entornos de alta tensión	13
2.2.1 <i>Definición de descarga parcial</i>	13
2.2.2 <i>Tipos de descarga parcial: clasificación</i>	14
2.2.3 <i>Generación de descargas parciales en entornos controlados</i>	16
2.2.4 <i>Degradación del sistema aislante ocasionada por las descargas parciales: parámetros para la monitorización</i>	19
2.3 Técnicas de detección de descargas parciales	20
2.3.1 <i>Introducción</i>	20
2.3.2 <i>Medida acústica de descargas parciales</i>	23
2.3.3 <i>Medida eléctrica de descargas parciales</i>	26
2.4 Procesamiento de señales generadas por descargas parciales	28
2.4.1 <i>Técnicas de acondicionamiento</i>	29
2.4.2 <i>Técnicas de localización</i>	30

3. PLATAFORMA DE GENERACIÓN Y MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES	33
3.1 Introducción	33
3.2 Generación de descargas parciales	34
3.2.1 Sistema de generación controlada.....	34
3.2.2 Especímenes papel-aceite.....	36
3.3 Sistemas de medida eléctrica y acústica.....	39
3.3.1 Sistema de detección eléctrica.....	39
3.3.2 Sistema de detección acústico	41
3.4 Sistema de adquisición y registro de datos.....	47
3.5 Registro de señales y evento patrón	48
3.5.1 Registro de la actividad de descargas parciales internas y superficiales	48
3.5.2 Definición de evento patrón.....	52
3.6 Daños ocasionados por las descargas parciales.....	53
3.7 Conclusiones	55
4. ANÁLISIS Y MODELADO DE LAS EMISIONES GENERADAS POR UNA DESCARGA PARCIAL	57
4.1 Introducción	57
4.2 Modelado de la señal.....	58
4.2.1 Filtro wavelet universal.....	59
4.2.2 Filtro wavelet específico.....	63
4.2.3 Modelado de señales provenientes de descargas parciales	73
4.3 Técnicas de detección de la señal.....	77
4.3.1 Correlación cruzada.....	77
4.3.2 Umbral de la envolvente.....	79
4.3.3 Criterio de la energía de la señal.....	79
4.4 Caracterización del acondicionamiento y de la detección de señales de DP	80
4.4.1 Generación de una serie temporal simulada.....	80
4.4.2 Características de filtrado del filtro wavelet específico.....	82
4.4.3 Detección del inicio de la señal.....	85
4.5 Conclusiones	89

5. DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES.....	91
5.1 Introducción	91
5.2 Configuración experimental	92
5.3 Evento patrón y señales patrón	93
5.4 Detección de señales	97
5.4.1 <i>Esquema general</i>	97
5.4.2 <i>Detección de máximos en la correlación cruzada</i>	98
5.4.3 <i>Ligaduras temporales</i>	100
5.4.4 <i>Evaluación de las señales detectadas</i>	102
5.5 Localización de defectos en el aislante	103
5.5.1 <i>Localización por asociación de señales de todos los canales: reconstrucción de eventos</i>	103
5.5.2 <i>Localización de regiones de actividad alta: construcción de la matriz tridimensional de eventos</i>	105
5.6 Conclusiones	110
6. MONITORIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE DESCARGAS PARCIALES EN LA PLATAFORMA DE ENSAYOS.....	113
6.1 Introducción	113
6.2 Detección y localización de descargas parciales internas	115
6.2.1 <i>Selección del evento patrón</i>	116
6.2.2 <i>Análisis de las medidas</i>	118
6.3 Detección y localización de descargas parciales superficiales.....	121
6.3.1 <i>Selección del evento patrón</i>	121
6.3.2 <i>Análisis de las medidas</i>	123
6.4 Conclusiones	126
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	129
7.1 Conclusiones	129
7.2 Líneas futuras	133
7.3 Publicaciones asociadas a la tesis	135
8. GLOSARIO	139
9. REFERENCIAS	143

10. ANEXOS	155
A.I Efectos de la propagación acústica en las fronteras de diferentes medios.....	157
A.II Plataforma de ensayos	161
<i>A.II.1 Esquemático de la plataforma.....</i>	<i>161</i>
<i>A.II.2 Sensor piezoeléctrico R15I.....</i>	<i>162</i>
<i>A.II.3 Sensor eléctrico HFCT.....</i>	<i>163</i>
<i>A.II.4 Sistema de adquisición Cleverscope</i>	<i>164</i>
<i>A.II.5 Sistema de identificación PDcheck</i>	<i>167</i>
A.III Implementación del interfaz de usuario	169
<i>A.III.1 Aplicación PDtool.....</i>	<i>169</i>
<i>A.III.1.1 Asistente de creación de patrones.....</i>	<i>170</i>
<i>A.III.1.2 Herramientas de detección</i>	<i>170</i>
<i>A.III.1.3 Análisis de las descargas parciales detectadas</i>	<i>171</i>
<i>A.III.1.4 Localización de la actividad de descargas parciales</i>	<i>171</i>
<i>A.III.2 Resolución caso práctico</i>	<i>172</i>

Índice de figuras

Figura 1. Circuito eléctrico equivalente de un defecto dentro del aislante [47]	13
Figura 2. Esquemático de DP tipo corona.....	14
Figura 3. Esquemático de DP tipo superficial.....	15
Figura 4. Esquemático de DP tipo interna.	16
Figura 5. Esquemático de un sistema de generación controlada de DP: fuente controlada de alta tensión AC (1) y espécimen generador de DP sumergido en una cuba con aceite (2).....	17
Figura 6. Especímenes usados para generar DP y estudiar sus emisiones acústicas [44].	18
Figura 7. Caminos simultáneos que puede adoptar una misma señal acústica desde su fuente hasta el sensor [55].....	24
Figura 8. Ejemplo de los distintos registros que puede realizar de forma simultánea un sensor ubicado en una pared detectando emisiones acústicas de una DP [55].	24
Figura 9. Esquemático del sistema de medida eléctrico de DP.	27
Figura 10. Resultado de un ensayo de DP. A la izquierda está el PRPD de la actividad de DP, y a la derecha la identificación de la lógica difusa de la actividad de DP [14].	28
Figura 11. Localización de una DP mediante triangulación por medida del tiempo de vuelo [22]: A la izquierda los tiempos de vuelo se calculan con referencia eléctrica ($t_{ref} = 0$) y a la derecha con referencia sólo acústica ($t_{ref} \neq 0$)	31

Figura 12. Esquemático del sistema generador de DP.....	34
Figura 13. Fotografía de la plataforma real de ensayos en el LINEALT.....	35
Figura 14. Fotografía del sistema generador de DP internas.....	37
Figura 15. Esquemático del sistema generador de DP internas.....	38
Figura 16. Esquemático del sistema generador de DP superficiales.....	38
Figura 17. Esquemático del sistema generador de DP con detección eléctrica.....	40
Figura 18. Ejemplo de señal detectada con el HFCT a una carga inyectada de 5 pC.....	40
Figura 19. Ejemplo de calibración entre la amplitud medida y la carga de la DP.....	41
Figura 20. Esquemático de un sistema de detección acústico de DP interno y externo ..	42
Figura 21. Fotografía de un experimento con medida acústica interna (1) y externa (2).	42
Figura 22. Esquemático de un sistema de detección acústico de DP basado en R15I.....	43
Figura 23. Diagrama de bloques del esquema optoelectrónico utilizado para la detección con sensor interno de fibra óptica [80].....	44
Figura 24. Esquemático sensor de fibra óptica [80].....	45
Figura 25. (a) Esquemático de la plataforma de ensayos; (b) registro de DP internas con PZT (negro) y FO (rojo) y (c) registro de DP superficiales con PZT (negro) y FO (rojo) [56].....	46
Figura 26. Primeras medidas experimentales de DP con dos canales: HFCT (rojo) y PZT (azul).....	47
Figura 27. Configuración experimental de generación de DP.....	49
Figura 28. Medida de tres sensores acústicos PZT externos y un sensor HFCT eléctrico para la generación de DP internas.....	50
Figura 29. Medida de tres sensores acústicos PZT externos y un sensor HFCT eléctrico para la generación de DP internas.....	50
Figura 30. Medida de tres sensores acústicos PZT externos y un sensor HFCT eléctrico para la generación de DP superficiales.....	51
Figura 31. Dos eventos individuales con características muy similares.....	52
Figura 32. Fotografía del experimento de daño por DP.....	54
Figura 33. Pressboard dañado en el laboratorio.....	54
Figura 34. Ejemplo de wavelets madre de la familia Daubechies.....	60
Figura 35. DWT en forma de árbol: una sucesión de filtros paso-alto y paso-bajo.....	61
Figura 36. Ejemplo práctico de un DWT y filtrado correspondiente.....	62

Figura 37. Distribución del PMCC (a) y de la E_{norm} (b) para cada una de las componentes wavelet $D_i(t)$ de una señal acústica. 65

Figura 38. Reconstrucción wavelet (rojo) y señal original (azul) de una DP acústica utilizando las descomposiciones con mayor Eval. 65

Figura 39. Espectro de la reconstrucción wavelet (rojo) y señal original (azul) de una DP acústica utilizando las descomposiciones con mayor Eval. 66

Figura 40. Distribución del PMCC (a), de E_{norm} (b) y Eval (c) para cada una de las componentes wavelet $D_i(t)$ 66

Figura 41. Reconstrucción wavelet de la señal original utilizando las cinco descomposiciones con mayor PMCC: (rojo) señal original (azul) reconstrucción... 68

Figura 42. Espectro de la reconstrucción wavelet (rojo) de la señal original (azul) utilizando las cinco descomposiciones con mayor PMCC. 68

Figura 43. Reconstrucción wavelet (rojo) de la señal original (azul) utilizando las cinco descomposiciones con mayor Eval. 70

Figura 44. Espectro de la reconstrucción wavelet (rojo) de la señal original (azul) utilizando las cinco descomposiciones con mayor Eval. 70

Figura 45. Comparación del valor individual (azul) y acumulado (rojo) cuando los términos $D_j(t)$ se ordenan en función del parámetro Eval (c) para: PMCC (a), E_{norm} (b) y Eval (c). 71

Figura 46. Algoritmo de configuración del filtro wavelet específico a partir del patrón. 72

Figura 47. Algoritmo de filtrado de señales a partir de configuración previa. 73

Figura 48. Evento DP interna eléctrica (superior) y acústica (inferior)..... 74

Figura 49. Evento DP superficial eléctrica (superior) y acústica (inferior)..... 74

Figura 50. Componentes wavelet para la señal eléctrica de una DP interna..... 75

Figura 51. Componentes wavelet para la señal eléctrica de una DP superficial..... 75

Figura 52. Componentes wavelet para la señal acústica de una DP interna 76

Figura 53. Componentes wavelet para la señal eléctrica de una DP Superficiales..... 77

Figura 54. Ejemplo de la correlación cruzada (xcorr) entre una señal patrón DP seleccionada y una serie temporal en la que se quiere encontrar señales DP similares. 78

Figura 55. Señal acústica modelo DP interna (a); serie temporal modelada con ruido en azul y sin ruido en rojo (b) y el espectro asociado de la señal con ruido (c) 81

Figura 56. Comparación SNR de cada técnica de filtrado para el ruido monocromático.	82
Figura 57. Comparación PMCC de cada técnica de filtrado para el ruido monocromático.	83
Figura 58. Comparación SNR de cada técnica de filtrado para el ruido blanco.	84
Figura 59. Comparación PMCC de cada técnica de filtrado para el ruido monocromático.	85
Figura 60. Promedio de detección de tiempos de inicio de la señal para relación de ruido blanco $R = 2$	86
Figura 61. Promedio de detección de tiempos de inicio de la señal para relación de ruido blanco $R = 4$	87
Figura 62. Esquema adquisición de datos.	92
Figura 63. Selección de eventos de DP.	94
Figura 64. Selección de eventos de DP.	95
Figura 65. Ejemplo de formas de onda patrón seleccionadas por canal.	96
Figura 66. Diagrama de flujo para detectar DP en un único canal.	97
Figura 67. Partes eliminadas de la señal y de la correlación cruzada tras encontrar los máximos y eliminarlos de la correlación cruzada.	99
Figura 68. Resultado (inferior en rojo) de multiplicar la señal V por la correlación cruzada de color azul.	100
Figura 69. Ejemplo de localización por triangulación. En verde aparecen los eventos rechazados y en azul los seleccionados por el criterio mínimo de PMCC.	104
Figura 70. Ejemplo de conjunto de dos medidas asociadas a una misma DP.	105
Figura 71. Histograma entre un sensor acústico y su referencia eléctrica	106
Figura 72. Proyección espacial del histograma de la Fig. 71 realizando cortes en planos Z constante	107
Figura 73. Sistema bajo estudio	114
Figura 74. Captura ejemplo de la generación simultánea de DP internas y superficiales a 5 kV. Los 3 canales superiores son acústicos y el inferior eléctrico. Tiempo de adquisición 40 ms a una frecuencia de muestreo de 50 MSps.	115
Figura 75. Evento patrón de descarga parcial interna.	116
Figura 76. Histograma de los 3 sensores acústicos y su retroproyección asociada a la altura de la región donde se generan las DP ($z = 140\text{mm}$).	119

Figura 77. Retroproyección 2D de la matriz de eventos de la detección de DP internas para $z = 140$ mm y $v_{\text{sonido}} = 1.478$ mm/ μ s. 120

Figura 78. Evento patrón de descarga parcial interna. 121

Figura 79. Histograma de los 3 sensores acústicos y su retroproyección asociada a la altura de la región donde se generan las DP ($z = 130$ mm). 124

Figura 80. Retroproyección 2D de la matriz de eventos de la detección de DP superficiales para $z = 130$ mm y $v_{\text{sonido}} = 1.519$ mm/ μ s. 125

Figura 81. Retroproyección 3D de la matriz de eventos de la detección de DP superficiales para $z = 130$ mm y $v_{\text{sonido}} = 1.519$ mm/ μ s. 126

Figura 82. Transmitancia de una onda acústica generada por una DP superficial desde el aceite al PZT en un tanque de acero. 158

Figura 83. Transmitancia de una onda acústica generada por una DP superficial desde el aceite al PZT en un tanque de PMMA. 159

Figura 84. Transmitancia de una onda acústica generada por una DP interna desde el pressboard al PZT en un tanque de PMMA. 160

Figura 85. Menú principal. 169

Figura 86. Sistema experimental de generación de DP superficiales y sistema de adquisición de señales acústicas y eléctrica. 172

Figura 87. Herramienta de patrones. Seleccionada una señal patrón se representan (a) los datos asociados al patrón, (b) su ubicación y (c) su forma de onda. 173

Figura 88. Visualización de la base de datos de las DP obtenidas por canal. 174

Figura 89. Visualización de las DP detectadas. 174

Figura 90. Herramienta para la comparación de medidas de las DP y para seleccionar las DP de interés cuyos valores están resaltados. 175

Figura 91. Visualización de la actividad registrada por cada uno de los sensores y una representación para uno de los cortes del eje z. 176

Figura 92. Visualización tridimensional de la actividad para un corte del eje z. 176

ÍNDICE DE FIGURAS

Índice de tablas

Tabla 1. Grado de daño de cada tipo de DP en aislante papel-aceite.....	19
Tabla 2. Resumen comparativo de técnicas de detección de DP en sistemas papel-aceite.	20
Tabla 3. Relación de los parámetros bajo estudio, utilizando la ordenación de los D_j por el parámetro del PMCC.....	67
Tabla 4. Relación de los parámetros bajo estudio utilizando la ordenación de los D_n por el parámetro del Eval	69
Tabla 5. Valor orientativo del tiempo de procesamiento de la combinación de las técnicas usadas	88
Tabla 6. Datos extraídos del evento patrón DP internas	117
Tabla 7. Número de señales DP internas detectadas	118
Tabla 8. Datos extraídos del evento patrón DP superficiales.....	122
Tabla 9. Número de señales DP superficiales detectadas	123
Tabla 10. Propiedades acústicas de los elementos de un transformador. Datos extraídos de ⁽¹⁾ https://www.nde-ed.org y de ⁽²⁾ L. E. Lundgaard [21]	158

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Motivación

Los sistemas aislantes papel-aceite son una parte crítica en el diseño y en el correcto funcionamiento de los transformadores de potencia. Los transformadores están continuamente en funcionamiento y cualquier fallo o parada inesperada, puede desabastecer de energía a sectores vitales para la sociedad como son la industria o la población y causar grandes pérdidas económicas.

En este contexto, el sistema aislante está sometido a un estrés continuo, provocando una degradación constante en el mismo hasta su fallo. Las funciones del aislante son: ¹proteger al transformador frente a transitorios eléctricos no deseados, ²refrigerar componentes internos sometidos a esfuerzo continuo y ³asegurar su correcto funcionamiento en sus condiciones habituales de operación. Por ello, la ruptura del sistema aislante es una de las principales causas de fallo en el funcionamiento del transformador [1, 2]

El mantenimiento predictivo de un transformador y la estimación de su tiempo de vida útil requieren, por tanto, evaluar la degradación o envejecimiento de sus materiales aislantes y observar cómo evoluciona dicho envejecimiento con el tiempo [3]. En consecuencia, son necesarios sistemas de diagnóstico que se puedan utilizar en línea (con el transformador activo) y que sean no invasivos (o bien que estén ubicados en el exterior, o bien que sean completamente inmunes frente a los campos electromagnéticos dentro del transformador).

El sistema aislante de un transformador, generalmente papel-aceite, se compone de cartón prensado (*pressboard*), que es impregnado completamente en aceite mineral o de transformador para mejorar sus propiedades aislantes y eliminar la presencia de humedad, impurezas y gases disueltos. Aunque estos defectos se encuentran en concentraciones muy bajas al principio de la vida útil (gracias al control en el diseño y fabricación de los sistemas aislantes), aumentan a medida que envejece el transformador y son los responsables de la aparición de un fenómeno conocido como Descarga Parcial (DP).

Las DP son descargas de baja intensidad (desde unos pocos pC a miles de pC) que son a su vez síntoma y causa de la degradación del propio aislante [4] y que tienen lugar a tensiones nominales cuando hay divergencia de campo eléctrico dentro del aislamiento eléctrico sólido / líquido.

Las descargas parciales se definen según la norma IEC 60270 [5], del año 2000, como: “descarga eléctrica localizada que cortocircuita sólo parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede ser o no, adyacente a un conductor”. Sin embargo, en la norma IEC 62478 [6], de 2016, la definición profundiza en su naturaleza describiendo las descargas parciales como: “fenómeno físico complejo que consiste en una descarga eléctrica localizada causada por la ruptura parcial del medio aislante bajo la influencia de la tensión del campo eléctrico local”. La DP se manifiesta como un pulso de corriente extremadamente rápido (duración menor que 1 μ s), cuyo tiempo de subida y anchura dependen del tipo de descarga, del tipo de defecto, de la geometría y de la presión del gas de la vacuola donde se ha generado.

En el caso particular de sistemas aislantes papel-aceite, los ataques físicos y químicos producidos por las DP dentro de burbujas de aire generan otros elementos como iones, gases y residuos conductivos. Estos elementos derivados de la generación de DP, a su vez favorecen la proliferación de más DP (por ejemplo, la actividad de DP aumenta la

concentración de gases disueltos en el aceite como $(C_2H_2)/(C_2H_4)$, $(CH_4)/(H_2)$ y $(C_2H_4)/(C_2H_6)$ [7]).

Por tanto, las DP pueden utilizarse como un elemento de monitorización del envejecimiento del aislante, mediante el estudio de la evolución temporal de ciertos parámetros como: ¹el aumento global de la carga aparente de las DP, ²el aumento de la actividad de las DP (número de DP en un ciclo de red) o ³la aparición sistemática de actividad de DP concentrada en una región localizada del aislante.

Detectar una DP dentro de un transformador no es una tarea fácil y por ello requiere de sistemas con alta sensibilidad y el apoyo de técnicas de procesamiento. Esto se debe a la propia naturaleza de generación de las mismas. La DP es un fenómeno de baja magnitud y además, como describe Van Brunt en 1991 [8], su generación es un proceso estocástico; esto es, no se puede detectar bajo las bases de ningún sincronismo, sino que se genera con una cierta probabilidad cuando se dan las condiciones idóneas. Por ese motivo, para poder realizar un diagnóstico adecuado, es necesario caracterizar su naturaleza como un conjunto, parametrizando su actividad mediante variables estadísticas como pueden ser el PDIV (tensión a la que se inicia la actividad de DP) o el PDEV (tensión a la que se extingue la actividad de DP) [4].

La detección de DP se puede realizar a través de diferentes fenómenos asociados a las mismas [9-11], aunque en el presente trabajo nos vamos a centrar principalmente en dos: la detección acústica y la detección eléctrica.

La detección eléctrica de DP ha sido la más utilizada debido a que está directamente ligada al fenómeno y a que, en las condiciones adecuadas, se puede aplicar a cualquier escenario y a distintos planteamientos del problema. En 1968 se publicó la primera versión de la norma IEC 60270 [5] donde se describe la plataforma para generar DP, así como el sistema de medida para detectar DP. En 1995, Krivda publicó un artículo donde se caracteriza la forma del pulso eléctrico para poder identificar los distintos tipos de DP [12]. En la actualidad, la detección eléctrica mide la amplitud de la carga aparente (la integral del pulso de corriente generado por la DP) y registra la incidencia de DP en los instantes relativos de la fase eléctrica en la que se produce, con el objetivo de hacer una evaluación estadística, caracterizar las fuentes de DP detectadas e identificar el tipo de descarga [13]. Estos patrones de DP resueltos en fase (PRPD, *Phase Resolved Partial Discharge*) [14] dan información sobre el estado global del sistema aislante donde se realiza la medida.

Aunque la medida eléctrica de DP es la más extendida para la detección e identificación de las mismas, existen otras técnicas que aportan información complementaria. Entre ellas destaca la medida acústica que además de detectar DP permite localizar dónde se generan [15, 16]. Otra ventaja adicional de la medida acústica frente a la medida eléctrica en transformadores, es que los sensores acústicos no se ven afectados por el ruido eléctrico, y se pueden acoplar directamente al bastidor del transformador sin modificarlo [17].

Las técnicas acústicas han sido aplicadas desde hace bastante tiempo; en 1956 se publicó el uso de técnicas acústicas para detectar DP tipo corona [18]. Sin embargo, su detección en transformadores es complicada. Entre 1978 y 1985 Howells publicó un conjunto de artículos, de gran repercusión, donde abordaba por primera vez en profundidad la detección y localización acústica de DP en transformadores y en los que destacan la adopción de técnicas basadas en emisiones acústicas y su utilidad para la localización de la fuente de DP [19, 20]. En 1992, Lundgaard expuso los principales retos en la medida acústica y cómo abordarla [21, 22]; estos artículos tienen continuidad en 1995, cuando Eleftherion publica medidas reales en transformadores y demuestra la viabilidad de la medida acústica [15, 23] presentada por Lundgaard. En el año 2000, se publicó el estándar del IEEE C57.127-2000 que recoge las recomendaciones para la medida acústica de DP en equipos de potencia inmersos en aceite "IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions From Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors", que alcanzó su revisión definitiva en 2007 [16]. En la actualidad, la medida acústica de DP ha alcanzado su madurez con la publicación del primer estándar de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) sobre medidas no convencionales de DP: IEC 62478 – "Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods" [6].

La medida acústica de DP consiste en detectar la señal de ultrasonidos que se propaga directamente desde la región donde se genera la DP hasta el sensor (ondas longitudinales). Los sensores utilizados generalmente son cristales piezoeléctricos, PZT, que se colocan en la pared del transformador y que miden señales ultrasónicas entre 100 y 200 kHz; las DP se localizan mediante el cálculo de los tiempos de llegada de la señal acústica a varios sensores montados en el exterior [24-27]. En este esquema de medida la señal puede atravesar materiales con diferente impedancia acústica y, en consecuencia, la propagación acústica distorsiona la señal detectada en los sensores por: ¹atenuación en el

camino desde la fuente hasta el sensor (sobre todo si está montado en la pared de la cuba, donde se produce una reflexión), ²interferencia de dos caminos de propagación acústica, del camino principal y los ecos, y de diferentes fuentes acústicas, y ³atenuación de las componentes espectrales de mayor frecuencia acústica [21].

La distorsión provoca que dos sensores acústicos PZT ubicados en distintos lugares de la pared detecten una forma de onda distinta para una misma emisión acústica procedente de una DP. Esto se debe principalmente a que, además de la señal procedente del camino directo, se detectan los rebotes dentro de la cuba o la señal acústica propagada a través de la pared [28]. Por otro lado, dentro de las máquinas eléctricas existen fuentes de ruido acústico y eléctrico que afectan a la media acústica de DP [29]. Adicionalmente, cabe contemplar la presencia de varias fuentes de emisión acústica por la actividad de DP [25].

Para evitar estos efectos negativos de la propagación acústica, se han propuesto dos vías que pueden ser complementarias: la primera es detectar la emisión acústica lo más cerca posible de donde se genera la DP para minimizar los efectos de la propagación, y la segunda utilizar técnicas de procesamiento de la señal.

Para medir las emisiones acústicas lo más cerca posible de la fuente, cabe citarse como precursora la propuesta de usar guías de ondas acústicas que “acerquen” la fuente al sensor PZT montado en el exterior [30]. Posteriormente, con la tecnología de fibra óptica, es el sensor el que puede ubicarse en el interior cerca de la fuente de DP [31, 32]. La fibra óptica es inmune a los campos electromagnéticos y es resistente al entorno físico del interior del transformador, por lo que no interfiere con su normal funcionamiento. En este sentido, son varias las ventajas derivadas del uso de sensores de fibra óptica con respecto de la medida tradicional de sensores piezo-eléctricos ubicadas en la cara exterior de la cuba. La principal desventaja es la necesidad de instalarlos en el interior, lo que dificulta su uso en un parque de equipos eléctricos en explotación.

En cuanto a las técnicas de procesamiento el campo de estudio es muy extenso. A modo de introducción conviene destacar las distintas ramas. Por un lado, simular y comprender la propagación acústica dentro de un transformador para mejorar la detección individual: Wotzka [28, 33, 34]. Por otro lado, mejorar la detección individual con técnicas de filtrado y de localización clásicas [27] o mediante técnicas de reconocimiento de patrones [35] aplicadas a DP [13]. Se ha propuesto utilizar redes neuronales e inteligencia artificial [36-39] para identificar qué señales detectadas por un sensor

corresponder a una DP y de qué tipo es. Finalmente, distinguir y separar dos señales superpuestas detectadas de forma simultánea por distintos sensores [40].

Estas técnicas requieren de experimentos de caracterización y ensayos extrapolables a su implementación para transformadores. Es necesario un banco de pruebas que permita generar DP y controlar la actividad (pocos eventos aislados o muchos concentrados), el tipo (internas, superficiales o corona) y la magnitud de la carga desplazada. En la práctica consiste en una cuba con un espécimen inmerso al que se somete a excitación de alta tensión. El espécimen puede emular algún elemento interno a un transformador [41, 42], asegurar alta intensidad de las descargas, generalmente generando tipo corona con una punta metálica como conductor [43] o tener un diseño específico para ensayar con cada tipo de descarga, lo que permite estudiar su identificación [44].

Finalmente, aunque la tendencia es utilizar un único tipo de sensor para la detección de DP, la detección sincronizada de señales eléctricas y acústicas permite integrar la capacidad de detección e identificación de la medida eléctrica con la capacidad de localización de la medida acústica. La aproximación más sencilla de esta técnica es la medida acústica con referencia eléctrica utilizada para localización de DP de tipo corona a través de trilateración [27], En el otro extremo está el estudio de la correlación entre la magnitud eléctrica y la acústica para comprender el fenómeno físico subyacente que actúa en la generación de DP y en sus emisiones acústicas [45, 46].

Ubicado el entorno de la presente tesis, a continuación, se presentan los objetivos marcados para el desarrollo de la misma.

1.2 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es valorar la presencia de defectos y daños en sistemas aislantes papel-aceite, en entornos de alta tensión, mediante la detección en línea de las emisiones acústicas y eléctricas asociadas a las descargas parciales (DP) generadas como consecuencia del daño en el aislante.

Sobre la base de este objetivo se plantean los siguientes objetivos parciales:

- I. Diseñar una plataforma de ensayo de generación controlada de DP y un sistema de instrumentación que permita la medida en línea y sincronizada de las distintas señales y emisiones asociadas a las DP.
- II. Desarrollar e implementar herramientas de procesamiento en Matlab[®] para analizar y modelar las emisiones asociadas a las DP y mejorar la detección de las señales generadas por las DP en entornos con baja relación señal-ruido.
- III. Desarrollar un algoritmo de análisis que, utilizando la información de la configuración geométrica del experimento y de la forma de onda esperada de las señales, permita asociar la emisión detectada por dos sensores distintos (acústico – acústico o acústico – eléctrico) a la misma DP.
- IV. Utilizar la información obtenida sobre la localización y sobre las características de la actividad de DP para asistir a un usuario en la evaluación de posibles regiones dañadas en el aislante.
- V. Testear el sistema completo con DP 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 cuatro 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 generación de DP, los tipos de DP existentes y las técnicas más comunes de detección de las mismas para realizar un diagnóstico de sistemas aislantes papel-aceite. En primer lugar, se revisan los experimentos de generación y detección acústica de DP realizados por otros grupos de investigación y sus aportaciones. En este capítulo también se presentan los trabajos realizados por otros grupos de investigación sobre sistemas de detección y procesamiento para la detección acústica de DP, incluyendo los sensores acústicos (sensores PZT y sensores de fibra óptica), las técnicas de detección del inicio de la señal y técnicas de reducción de ruido.

La segunda parte describe la plataforma de ensayo para generar las DP y el sistema de instrumentación utilizado para registrarlas en diferentes configuraciones (Capítulo 3).

En este capítulo se describe el sistema experimental para generar DP internas y superficiales en sistemas aislantes papel-aceite. Asimismo, se especifican las características eléctricas y acústicas de las señales DP y se plantea el sistema de instrumentación óptimo para realizar la monitorización de estas señales.

La tercera parte está dedicada al análisis necesario para monitorizar las DP. Por un lado, se analizan y modelan las señales de DP individuales para utilizarlo en su detección y localización (capítulo 4) y, por otro lado, se desarrolla el procesamiento de las señales registradas en la plataforma experimental, orientado a detectar y localizar la actividad de DP en el aislante (capítulo 5). Esta parte trata en detalle el algoritmo implementado: adquisición, filtrado de ruido, identificación y localización de DP. En el apartado de localización se describen las diferentes arquitecturas y los diferentes algoritmos implementados.

En la cuarta parte se presenta una monitorización en línea de DP en la plataforma de ensayo (Capítulo 6). En esta monitorización se utilizan dos fuentes de generación de DP: una fuente con una superficie amplia de generación de DP internas y otra fuente de generación de DP superficiales más localizadas. Se estudia la presencia de defectos en el aislante a través de la actividad de DP detectada y de su localización.

Por último, en el Capítulo 7 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.

1.4 Marco de investigación y colaboraciones

La presente tesis se ha realizado en el marco del proyecto de investigación coordinado “Concepción, diseño y caracterización de un sistema de medida de descargas parciales en materiales aislantes mediante procedimientos acústicos y eléctricos ultrarrápidos. Aplicación en máquinas eléctricas” (No. DPI2006-15625-C03, Enero 2007 – Diciembre 2009, Coordinador José A. García Souto) financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, Dirección General de Investigación.

Por otro lado, la beca FPI-MICINN (Formación de Personal Investigador) No. BES-2007-17322 está asociada al subproyecto DPI2006-15625-C03-01 “Diseño y

caracterización de sensor de fibra óptica ultrasónico de alta frecuencia para la medida de descargas parciales aplicada a maquinas eléctricas y transformadores”.

La plataforma de ensayo para la generación de DP y las medidas eléctricas de DP se realizaron 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. DPI2006-15625-C03).

Posteriormente, los resultados finales se han obtenido en el marco del 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, Enero 2010 – Diciembre 2013, Coordinador José A. García Souto) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Las medidas combinadas de DP mediante técnicas acústicas (sensores PZT y sensor de Fibra Óptica), técnicas no convencionales UHF y técnicas eléctricas 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 (7 de Enero de 2011 – 1 de Abril de 2011) bajo la supervisión del Prof. Andrea Cavallini. La estancia fue financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante la ayuda EEBB-2011-44219 y está asociada a la beca FPI-MICINN No. BES-2007-17322.

Finalmente, esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Tecnología Electrónica, Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser (GOTL), de la Universidad Carlos III de Madrid.

Capítulo 2

Estado del arte en la detección de descargas parciales

2.1 Introducción

El mantenimiento predictivo de una máquina, o mantenimiento basado en la condición (CBM, *Condition Based Monitoring*), es el conjunto de actividades de seguimiento y diagnóstico continuo de un sistema, de tal forma que permite identificar el futuro de fallo de la máquina con la suficiente antelación, como para planificar una actuación correctora, ya sea reparar o sustituir un componente o retirar la máquina de servicio. Gracias al mantenimiento predictivo, se minimiza el tiempo que la máquina permanece inactiva y se maximiza su tiempo de vida.

En el caso de los transformadores, el mantenimiento predictivo es importante porque:
¹permite someter a sobreesfuerzos puntuales a la máquina cuando la demanda energética

de la red eléctrica así lo requiere, ²permite alargar la vida del transformador ajustando la carga de trabajo a su estado y ³permite planificar con la suficiente antelación el mantenimiento o la sustitución del transformador dañado, reduciendo de forma significativa los elevados costes económicos y sociales que puede suponer una retirada de servicio no prevista o un fallo inesperado.

El mantenimiento predictivo se basa en el hecho de que la mayoría de los fallos se producen lentamente y en que previamente al fallo se muestran indicios evidentes que pueden ser monitorizados. Para realizar el mantenimiento predictivo de una máquina es necesario identificar un fenómeno físico medible y parametrizable, cuyo registro temporal esté asociado con el desgaste o estado de la máquina en condiciones operativas. A tal efecto, se definen y gestionan valores de pre-alarma y de actuación de todos aquellos parámetros que se considera necesario medir y gestionar.

En el caso de los transformadores, su tiempo de vida viene asociado al envejecimiento de su sistema aislante [1, 2]. En concreto, en aquellos sistemas aislantes basados en papel-aceite, las descargas parciales (DP) pueden utilizarse como un elemento de control de su degradación, mediante el estudio de la evolución temporal de ciertos parámetros como: ¹el aumento global de la carga aparente de las DP, ²el aumento de la actividad de las DP (número de DP en un ciclo de red) o ³la aparición sistemática de actividad de DP concentrada en una región localizada del aislante.

En el siguiente apartado se describen los diferentes tipos de DP y sus características, con el objeto de validar su monitorización para el mantenimiento predictivo de transformadores.

2.2 Descargas parciales en sistemas aislantes papel-aceite en entornos de alta tensión

2.2.1 Definición de descarga parcial

La norma IEC 62478 [6] define las descargas parciales como: “fenómeno físico complejo que consiste en una descarga eléctrica localizada causada por la ruptura parcial del medio aislante bajo la influencia de la tensión del campo eléctrico local”. La DP se manifiesta mediante un pulso de corriente extremadamente rápido (duración menor que $1 \mu\text{s}$), cuyo tiempo de subida y anchura dependen del tipo de descarga, del tipo de defecto, de la geometría y de la presión del gas.

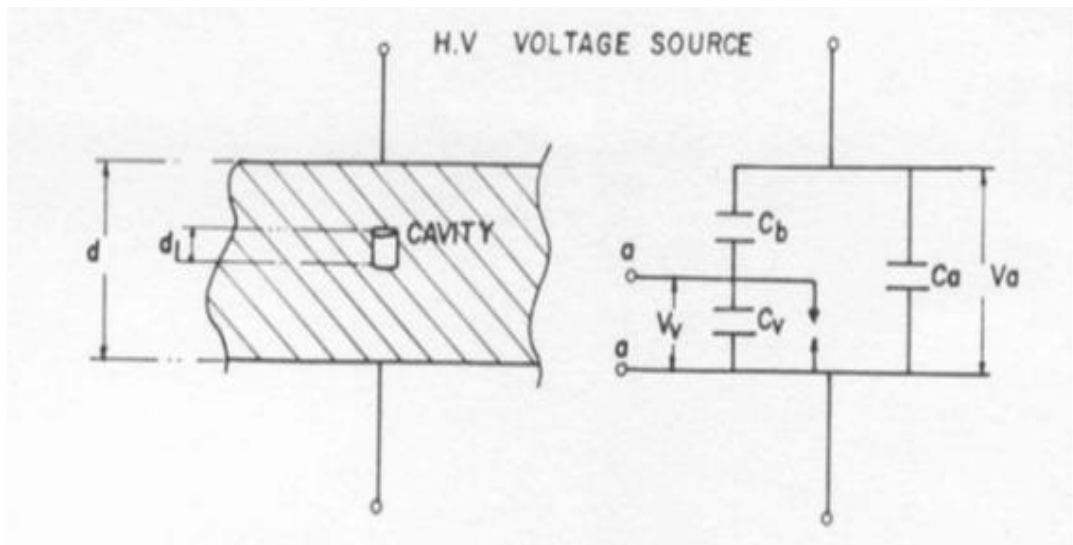


Figura 1. Circuito eléctrico equivalente de un defecto dentro del aislante [47]

En sistemas papel-aceite las DP se producen dentro de las burbujas de gases disueltos en el aceite [8], ya sea dentro o fuera del papel. Aunque existen DP en líquidos, la formación del canal ionizado que se asocia a las DP requiere que el líquido se haya vaporizado antes y que se formen cavidades gaseosas. El volumen que comprende dicha cavidad en el dieléctrico tiene su circuito eléctrico equivalente en tensión alterna. El modelo eléctrico, despreciando las pérdidas, se presenta en Fig. 1.

En el circuito equivalente se observan tres capacidades diferentes en el aislante:

- C_b representa la capacidad existente por encima y por debajo de la cavidad.

- C_v muestra la capacidad de la vacuola.
- C_a representa la capacidad del resto del aislante (como si fuera una rama en paralelo al camino de la cavidad).

El daño provocado al material aislante, sometido a alta tensión en alterna de 50 Hz durante el proceso de descargas, se debe al bombardeo de electrones energizados generados por la propia DP. Incluso cuando la energía de cada DP es bastante pequeña, una parte importante de los electrones movilizados pueden tener energía suficiente para romper enlaces moleculares en un impacto; esto provoca cambios químicos en el aislante (degradación) que influyen en el comportamiento posterior de las DP [8].

2.2.2 Tipos de descarga parcial: clasificación

Atendiendo a las características de la región donde se producen, las DP se pueden clasificar en tres tipos bien diferenciados: corona, superficiales e internas [4].

2.2.2.1 Descargas parciales tipo corona o externas

La descarga en corona es la descarga que se produce en el aire o el gas que rodea a un conductor. Tiene lugar cuando el campo eléctrico localizado excede la tensión de ruptura del aire o el gas circundante. Esto ocurre típicamente en las puntas o en los bordes afilados de los conductores. Es típico de este fenómeno que la carga movilizada sea alta y se manifieste con una gran concentración de energía en la punta para luego distribuirse en forma de árbol (Fig. 2).

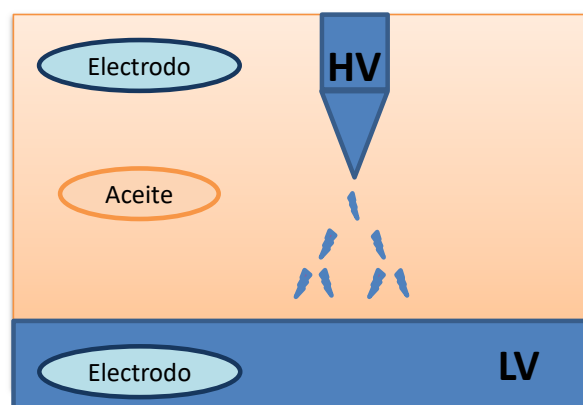


Figura 2. Esquemático de espécimen de DP tipo corona.

2.2 Descargas parciales en sistemas aislantes papel-aceite en entornos de alta tensión

La descarga en corona puede considerarse relativamente inofensiva en equipos de exteriores o no estancos, ya que los gases corrosivos son transportados lejos del entorno de generación. Sin embargo, si la descarga en corona tiene lugar en un entorno cerrado, los gases corrosivos no tienen salida y pueden producir daños adicionales.

En el interior de transformadores se pueden dar casos donde una mala conexión genere DP de este tipo, pero al estar el aceite en constante movimiento dentro del transformador son menos dañinas que las superficiales y las internas. Debido a sus elevados niveles de señal, fueron el primer tipo de DP detectadas [18] y estudiadas dentro de un transformador [45].

Acústicamente lo que se espera es que la emisión se localice en la punta y que los niveles de detección sean altos en todas las direcciones ya que la señal acústica se puede propagar en el entorno libremente, sin obstáculos.

2.2.2.2 Descargas parciales superficiales

La DP superficial es la descarga que se produce en la frontera entre dos medios dieléctricos. La descarga bordea la superficie del aislante para encontrar el camino hasta el electrodo (Fig. 3), generando pistas de conducción en la superficie del aislante y reduciendo su eficacia. Este tipo de DP está estrechamente asociada a la contaminación y la humedad, y es una forma de DP relativamente común.

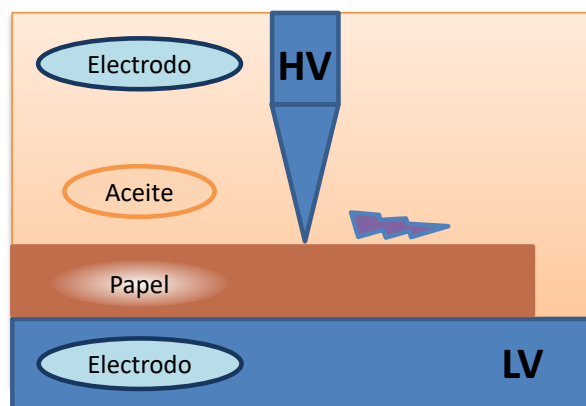


Figura 3. Esquemático de espécimen de DP tipo superficial.

Las emisiones acústicas de las DP superficiales son bastante parecidas a las emisiones acústicas de las descargas tipo corona, ya que tampoco están confinadas en el papel y se propagan libremente por el aceite. Por este motivo también se espera que los niveles de señal detectados sean altos en todas las direcciones (Anexo A.I).

2.2.2.3 Descargas parciales internas

La DP interna es la descarga que se produce en el interior del material sólido o en el líquido aislante y está asociada a pequeñas cavidades gaseosas e impurezas (huecos microscópicos).

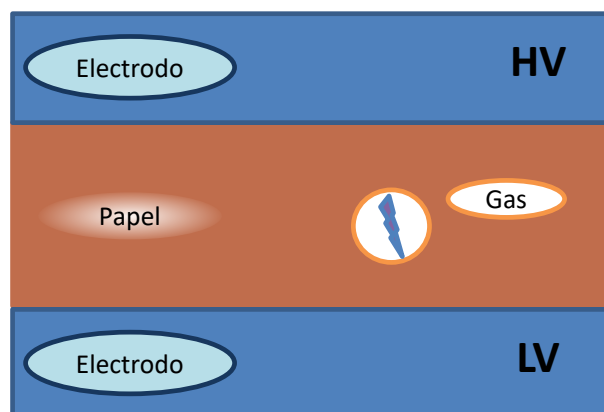


Figura 4. Esquemático de espécimen de DP tipo interna.

Se asume que la descarga se produce generalmente entre las paredes de la vacuola. La carga desplazada suele ser pequeña (por debajo de 100 pC); por ello, los niveles de señal detectados tanto eléctrica como acústicamente suelen ser bastante bajos.

Además, el hecho de que la vacuola esté atrapada dentro del papel y confinada entre electrodos, dificulta enormemente la detección acústica: primero, porque la señal acústica queda confinada dentro del material debido a las diferencias de impedancia acústica de los diferentes medios que atraviesa; y segundo, porque el papel tiene un alto coeficiente de absorción acústica, lo que provoca una alta atenuación a medida que la emisión acústica se propaga por él.

2.2.3 Generación de descargas parciales en entornos controlados

Generar DP de forma controlada no es una tarea sencilla debido a su naturaleza estocástica; por ello, es necesario controlar cada uno de los elementos que componen el sistema de generación para garantizar que se producen DP con las características deseadas de intensidad (o carga aparente), grado de actividad, tipo y ubicación.

2.2 Descargas parciales en sistemas aislantes papel-aceite en entornos de alta tensión

En ese sentido, la norma IEC 60270 “High-voltage test techniques – Partial discharge measurements” [5], supone una referencia obligada en cuanto al diseño del sistema eléctrico.

El sistema generador básicamente consta de dos partes: ¹una fuente controlada de alta tensión en corriente alterna y ²una cuba llena de aceite de transformador donde se introducen los especímenes donde se generan las DP bajo estudio (Fig. 5).

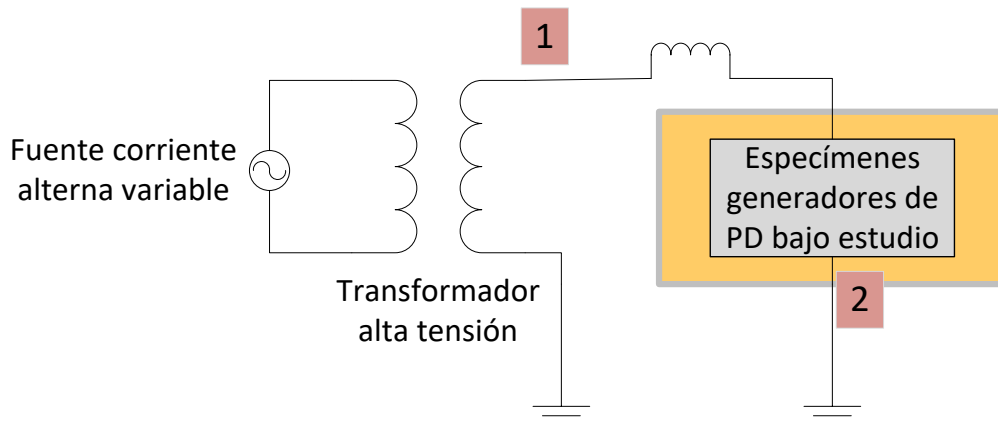


Figura 5. Esquemático de un sistema de generación controlada de DP: fuente controlada de alta tensión AC (1) y espécimen generador de DP sumergido en una cuba con aceite (2).

El sistema de generación de DP se controla mediante los dos elementos principales que lo componen: la fuente de tensión variable y el espécimen donde se generan las DP.

El control de la tensión de excitación nos permite aumentar la energía global de la actividad de DP. Este aumento de energía puede manifestarse mediante el aumento de la carga aparente media y máxima y/o mediante un aumento de la actividad; la respuesta dependerá del tipo de DP, el tipo de daño y otros parámetros.

Mediante la selección del espécimen, se puede controlar el tipo de DP que se generan y la región donde se producen. La selección del espécimen también permite centrar el estudio en elementos concretos. Por ejemplo, hay experimentos que buscan generar DP en entornos que emulan a un transformador, como en Markalous et al. que genera DP en un arrollamiento sumergido en una cuba metálica [41]. Otros buscan simular descargas que produzcan emisiones acústicas intensas en el interior del transformador, como en Nagamani et al. que utiliza agujas para generar DP tipo corona en el interior de un transformador [43] o el de Olivieri et al. que simula una emisión acústica dentro de un transformador [42].

Por otra parte, en algunos experimentos se han desarrollado especímenes específicos para generar DP del tipo deseado. En experimentos estrictamente eléctricos pueden citarse Cavallini et al. [48] y en experimentos sólo acústicos los trabajos de Gyung-Suk et al. [44, 49] donde se hace una caracterización de las señales acústicas emitidas por tres especímenes distintos, aunque sin correlación con el tipo de DP que se genera.

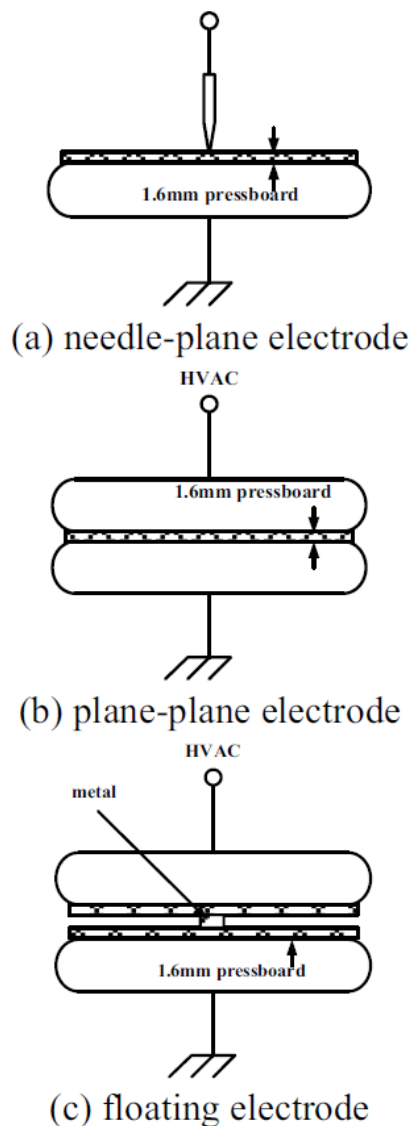


Figura 6. Especímenes usados para generar DP y estudiar sus emisiones acústicas [44].

Por último, aunque este trabajo se circunscribe exclusivamente a sistemas de alta tensión en alterna (HVAC), conviene comentar que las DP no sólo se generan mediante una excitación en alterna, si no que despiertan una atención creciente en entornos de excitación en continua de alta tensión (HVDC) [50] debido a su interés para transmitir energía de forma submarina y a largas distancias [51].

2.2.4 Degradación del sistema aislante ocasionada por las descargas parciales: parámetros para la monitorización

Como se ha comentado anteriormente, la degradación del aislante se debe a la generación de DP, aunque no todas las DP degradan el aislante por igual.

Si atendemos al daño total ocasionado por las DP, las de tipo corona son potencialmente las más peligrosas, ya que su carga aparente es muy elevada. Sin embargo, al producirse en el aceite, sus derivados (cambios localizados de temperatura o generación de gases) se “diluyen” por todo el transformador gracias al movimiento de convección del propio aceite (de ahí que el daño local de la DP se considere regenerable).

Las DP superficiales tienen una magnitud similar a las de tipo corona, pero al recorrer la frontera papel-aceite generan una cera de color blanco que daña una superficie pequeña del papel en torno a la zona de generación. Por producir un daño leve en la superficie del papel se consideran más dañinas que las de tipo corona.

Las DP internas, en promedio, tienen una carga aparente inferior a las otras dos. Sin embargo, al estar muy localizadas y no permitir que se dispersen sus derivados y emisiones (gases, iones, calor...), generan un alto efecto memoria en el papel. Como consecuencia de este efecto memoria, las DP internas se concentran en la zona dañada de forma muy localizada hasta que se produce una descarga que acaba provocando un fallo en la máquina.

Tipo de DP	Magnitud máxima	Máxima actividad por ciclo	Daño en aceite (regenerable)	Daño en papel (no regenerable)	Daño efectivo al aislante
<i>Interna</i>	Baja	Alta	Bajo	SI (Interno)	ALTO
<i>Superficial</i>	Alta	Baja	Alto	SI (Superficial)	MEDIO
<i>Corona</i>	Alta	Baja	Alto	NO	BAJO

Tabla 1. Grado de daño de cada tipo de DP en aislante papel-aceite.

De la Tabla 1 extraemos, por tanto, que para el mantenimiento predictivo es importante que la técnica utilizada clasifique el tipo de DP que se está generando,

ya sea mediante identificación [48] o a través de su localización en algún elemento crítico del transformador, como el papel de los arrollamientos bobinados [27].

2.3 Técnicas de detección de descargas parciales

2.3.1 Introducción

La medida de DP permite estudiar la evolución del envejecimiento de un aislante. A tal fin, se realiza un seguimiento de la evolución temporal de algunos parámetros de la DP como su carga aparente, la actividad por ciclo de red, su localización y el tipo.

Cada una de las técnicas que se va a presentar a continuación, se encuentra regulada bajo una norma IEC (*International Electrotechnical Commission*) y se centra en una de las emisiones asociadas a la generación de DP; por tanto, la información que aporta es complementaria al resto de técnicas. La elección de una técnica u otra dependerá del sistema analizado y del tipo de información que se busca [11].

A modo de resumen comparativo se presenta la siguiente tabla:

Tipo de detección	<i>En línea</i>	<i>Inmune EMI/EMC</i>	<i>Localización</i>	<i>Identificación tipo de daño</i>	<i>Detección de otros fallos</i>
Eléctrica	SI	NO	NO	SI	NO
Acústica	SI	SI	SI	NO	NO
Radio frecuencia	SI	NO	SI	NO	NO
DGA	NO	SI	NO	SI	SI

Tabla 2. Resumen comparativo de técnicas de detección de DP en sistemas papel-aceite.

2.3.1.1 Detección de la emisión acústica

El objetivo de esta técnica es detectar las señales mecánicas emitidas por la DP. La descarga se manifiesta como una pequeña explosión que excita una onda mecánica que se propaga a través del aislante [21, 22].

La banda de emisión se encuentra típicamente entre 20 kHz y 250 kHz, aunque también hay emisiones en el rango audible (entre 100 Hz y 20 kHz) [6]. Los rangos de detección se escogen teniendo en cuenta las características del sistema aislante. Por ejemplo, en transformadores la banda de detección típica está entre 100 kHz y 200 kHz.

La detección acústica de DP está regulada por la guía del IEEE de 2007 [16] y por la norma IEC 62478 [6], donde se definen tanto la metodología para detectar DP en transformadores, recomendaciones de filtros y sistemas de localización.

Para detectar la señal acústica se pueden emplear generalmente un grupo de sensores piezoeléctricos o PZT [16]; de esta forma se puede triangular la señal acústica recibida para encontrar la fuente de la misma [6, 22].

Una de las ventajas de este método es la posibilidad de hacer medidas sin descargo del equipo, su portabilidad y su inmunidad a las interferencias electromagnéticas. Sus principales desventajas radican en el acoplo de otras señales acústicas del exterior, así como en efectos no deseados de la propagación de la señal por el medio antes de llegar al sensor, como son la atenuación, las reflexiones, la refracción y la reverberación de barreras sólidas dentro del transformador. Por este motivo resulta atractivo el empleo de sensores internos como, por ejemplo, los de fibra óptica [52].

2.3.1.2 Detección eléctrica

Esta técnica de detección está definida en la norma IEC 60270 [5] y consiste en introducir en la red un condensador de acoplo que permite medir la carga de las descargas parciales (en pC) mediante sensores eléctricos en serie con el condensador.

Las ventajas de esta técnica son que detecta la señal de una DP de forma inmediata, permite identificar el tipo de DP, se puede calibrar para calcular la carga aparente de la DP y se puede utilizar en cualquier tipo de máquina, si bien bajo restricciones de ruido eléctrico y atenuación de la señal [11].

En los últimos años, esta técnica se ha visto favorecida por la aplicación de mapas tiempo-frecuencia o la identificación de DP mediante la aplicación de patrones resueltos en fase (PRPD) [14].

2.3.1.3 Detección de emisiones en radio frecuencia VHF y UHF

Para la detección de las DP se utilizan antenas que operan en la banda de VHF (*Very High Frequency*) en el rango entre 30 MHz y 300 MHz, y en la banda UHF (*Ultra High Frequency*) en el rango entre 300 MHz y 3 GHz. La detección por VHF y UHF ha sido incluida en la norma IEC 62478 [6] para la detección y localización de DP.

Esta técnica de detección tiene la ventaja de que no es invasiva ya que permite detectar mediante antenas y receptores sin estar en contacto con el dispositivo bajo estudio, aunque tiene la desventaja de que no puede medir desde el exterior las radiaciones producidas dentro de cubas metálicas. El principal problema radica en la alta atenuación que sufre la señal electromagnética antes de llegar a la antena de detección, así como el ruido por interferencia electromagnética producido por los sistemas de telecomunicaciones en el rango de UHF.

2.3.1.4 Análisis de gases disueltos en aceite (DGA)

La detección de DP mediante la concentración de gases disueltos en el aceite está descrita en la norma IEC 61181: “Mineral oil-filled electrical equipment - Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment” de 2007 [53].

Esta técnica de detección consiste en analizar la concentración de gases en el aceite mineral del transformador para determinar los fallos que se han producido en el mismo. Para ello se toma una muestra de aceite de la cuba del transformador y se analiza la concentración de gases en el mismo: acetileno, metano, hidrógeno, dióxido de carbono, etileno y oxígeno en forma de ozono con alto poder oxidante. Además, no sólo permite detectar DP sino también los derivados del sobrecalentamiento, descargas y otros tipos de fallos eventuales producidos en el transformador a lo largo de su vida de uso.

Por tanto, la ventaja de este método es que dependiendo de la distinta concentración de gases se puede evaluar qué clase de fallo se ha producido en el medio aislante. Su mayor limitación es que no permite localizar los daños y que el análisis suele ser periódico y fuera de línea.

A continuación, se profundizará en la detección de las señales eléctricas y de las señales acústicas de las DP con el objetivo de poder dar respuesta sobre dónde, cuándo y cuántas DP se generan y de analizar qué información pueden aportar estos datos sobre el envejecimiento del aislante.

2.3.2 Medida acústica de descargas parciales

A pesar de que la detección acústica de DP es una técnica con un largo recorrido [6, 16, 20-22], no es menos cierto que la detección no deja de presentar dificultades a la hora de medir desde el exterior del transformador [28, 54, 55].

Los fenómenos que afectan a la detectabilidad de la emisión acústica son:

- 1- Baja energía generada de la DP.
- 2- Emisión acústica de campo esférico.
- 3- Propagación de la emisión acústica desde la fuente al sensor.
- 4- Ruido acústico propio del funcionamiento de los elementos de la máquina.

A continuación se trata con más detalle cada uno de ellos, prestando especial atención a cómo afectan a la medida realizada con un sensor PZT montado en el exterior de la cuba. Intencionadamente se omiten en este apartado las medidas acústicas con sensores internos, como los sensores interferométricos de fibra óptica sumergidos en aceite [56], los cuales tienen una problemática diferente y se presentarán aparte.

2.3.2.1 Energía de la descarga parcial

La primera dificultad en la detección acústica de DP internas es debida a que son descargas de baja magnitud (desde 1 pC a 10000 pC) y además están confinadas. Así que, como punto de partida, los niveles esperados son bastante bajos.

2.3.2.2 Emisión acústica de campo esférico

La emisión acústica de una DP se considera procedente de una fuente puntual y se manifiesta, de forma ideal, como una onda de presión esférica. Este tipo de onda tiene dos características esenciales. La primera es que la intensidad se atenúa en función de la distancia o radio al cuadrado:

$$I_{propaga} \propto I_{emitida} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2.1)$$

La otra característica es que, al ser una propagación omnidireccional, la misma emisión acústica puede llegar por diferentes caminos al sensor [28]: ¹el camino directo (ondas longitudinales) que es la señal buscada, ²rebotes (ondas longitudinales) que pueden ser varios y ³propagación por la pared donde se sitúa el sensor (ondas transversales).

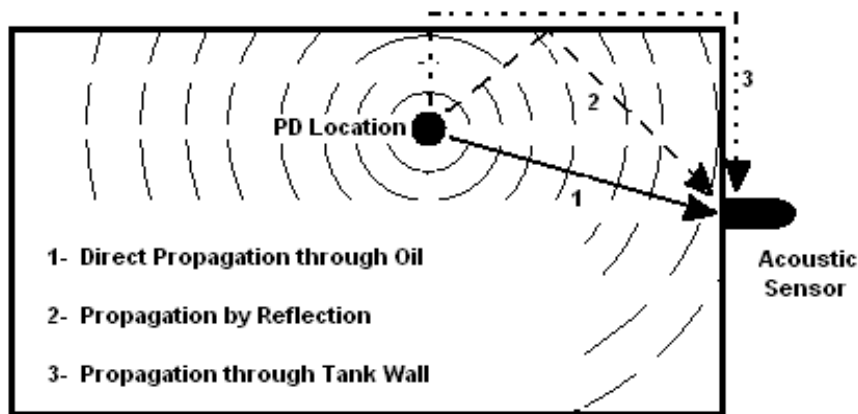


Figura 7. Caminos simultáneos que puede adoptar una misma señal acústica desde su fuente hasta el sensor [55].

Como consecuencia de la existencia de estos tres caminos, las reflexiones y la propagación por la pared pueden distorsionar la señal objetivo, la de propagación directa; además, dicha distorsión será dependiente de la posición seleccionada para el sensor.

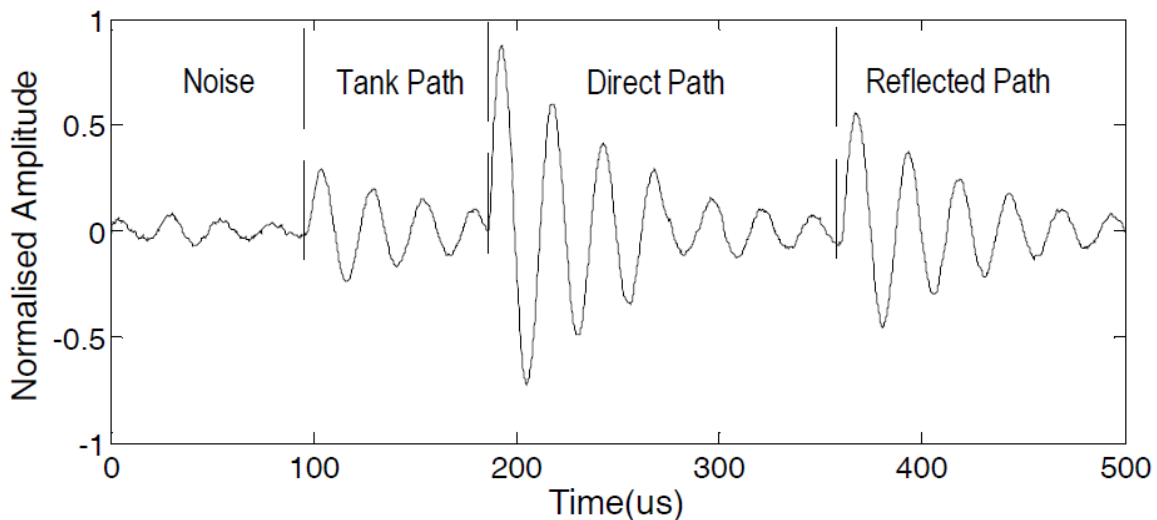


Figura 8. Ejemplo de los distintos registros que puede realizar de forma simultánea un sensor ubicado en una pared detectando emisiones acústicas de una DP [55].

En principio, los rebotes que llegan al sensor tienen la misma frecuencia central que la emisión por camino directo, por lo que no se pueden distinguir en frecuencia. Sin embargo, no suponen un gran problema cuando se detectan emisiones acústicas aisladas o suficientemente espaciadas temporalmente, debido a que, al recorrer más distancia que el camino directo, llegan retrasadas y con menos amplitud.

Las ondas transversales sí pueden suponer un problema bajo ciertas condiciones; por ejemplo, pueden llegar antes que las señales del camino directo para ciertas configuraciones geométricas, ya que la velocidad de una onda transversal en acero es aproximadamente 3,6 veces mayor que la velocidad de una onda longitudinal en aceite. No obstante, si tomamos el sensor *R15I* como ejemplo de los que se instalan en las paredes de la cuba, cabe destacar que detecta las señales longitudinales con resonancia en torno a 150 kHz, mientras que las vibraciones transversales excitan una resonancia en torno a 120 kHz, por lo que se puede utilizar esta diferencia de frecuencia para identificar cada tipo de señal y separar unas de otras. Cabe mencionar que los sensores internos de fibra óptica, al encontrarse sumergidos, no están expuestos a las ondas transversales de las paredes.

Como consecuencia de que los caminos secundarios (rebotes y ondas transversales a través de la pared) son diferentes hasta cada sensor acústico montado en el exterior, resulta que la distorsión es independiente en cada uno de ellos. Por ese motivo, a no ser que los sensores estén muy próximos entre sí, la correlación cruzada entre canales es muy baja, lo que dificulta el correcto cálculo de la diferencia de tiempos de vuelo mediante esta técnica propuesta en la guía del IEEE [16].

Por otra parte, si se generan varias DP en una misma región confinada, es de esperar que un mismo sensor las registre con alta correlación entre sus respectivas formas de onda, debido a que el camino de propagación es prácticamente el mismo. Esto se puede utilizar para identificar señales de una misma región y separar señales generadas en distintas regiones.

2.3.2.3 Propagación acústica

La propagación acústica tiene dos efectos que dificultan la medida. El primero es la atenuación que sufre la señal longitudinal o directa hasta que llega al sensor (este parámetro se explica con detalle en el Anexo A.I). Por otro lado, la propia propagación de la señal provoca una distorsión en su forma de onda debido a que la respuesta frecuencial

del sistema no es plana. Por ejemplo, la atenuación es mayor para las componentes acústicas de alta frecuencia [22].

Al igual que en el apartado anterior, se espera que los sensores de fibra óptica sufran en menor medida los efectos de la propagación: ¹porque se pueden ubicar más cerca de la fuente de DP y ²porque se evita la atenuación por reflexión con la pared cuba.

2.3.2.4 Ruidos propios del funcionamiento de la máquina

La evaluación de los ruidos propios por el funcionamiento de la máquina queda fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, atendiendo a las recomendaciones de la guía del IEEE [16], en este trabajo se utilizarán sensores piezoeléctricos para la medida con un ancho de banda entre 100 y 200 kHz y la frecuencia central en 150 kHz.

El motivo para elegir este tipo de sensores, a pesar de que la emisión acústica se espera entre los 100 Hz y los 250 kHz [6], es evitar los ruidos presentes por otros elementos del transformador como el ruido Barkhausen (por magnetoconstricción del núcleo) que está en torno a 50 kHz / 60 kHz o el ruido de los sistemas de refrigeración o el OLTC (*onload tap changer*) [29].

2.3.3 Medida eléctrica de descargas parciales

En la presente tesis, la medida eléctrica tiene como objetivo aportar dos datos fundamentales: el primero es tener la referencia de tiempos del instante de generación de la DP, el segundo es tener la identificación del tipo de DP que se están generando, con vistas a interpretar las medidas acústicas realizadas.

La medida eléctrica resulta de interés, principalmente porque el efecto inmediato de la generación de una DP es un desplazamiento de carga que es bien conocido [4, 57] y porque además se puede aplicar en cualquier entorno [11].

Otra de las ventajas de la señal eléctrica es que cada tipo de DP tiene asociadas unas características temporales en su forma de onda, que permiten la identificación del tipo de DP y, por tanto, del defecto. En este sentido existen distintas técnicas entre las que cabe destacar: ¹técnicas de identificación a partir de la parametrización de una señal temporal individual [58, 59], ²identificación por los espectros individuales de una señal DP [60],

identificación a través de la actividad de DP mediante PRPD [14] y clases de clasificación [61, 62].

Para tener garantías de que las DP generadas en este trabajo se corresponden con las que se quieren estudiar, se ha utilizado el equipo comercial *PDcheck* de la marca TechImp S.r.l. (Anexo A.II.5). Este equipo está basado en los trabajos realizados en la universidad de Bolonia para la identificación de DP [14].

De forma resumida, la identificación de las DP se realiza a través del análisis de la actividad de DP medida en el objeto de ensayo. A pesar de que las DP son un proceso estocástico, cada tipo de DP presenta un conjunto de características estadísticas únicas denominado patrón, que se puede utilizar para identificar su actividad. Esta técnica se conoce como PRPD o patrón de DP resuelto en fase y se aplica sobre el esquema de medida de la Fig. 9, que está formado por el sistema de ensayo bajo estudio y una rama en paralelo donde se conecta el equipo de medida.

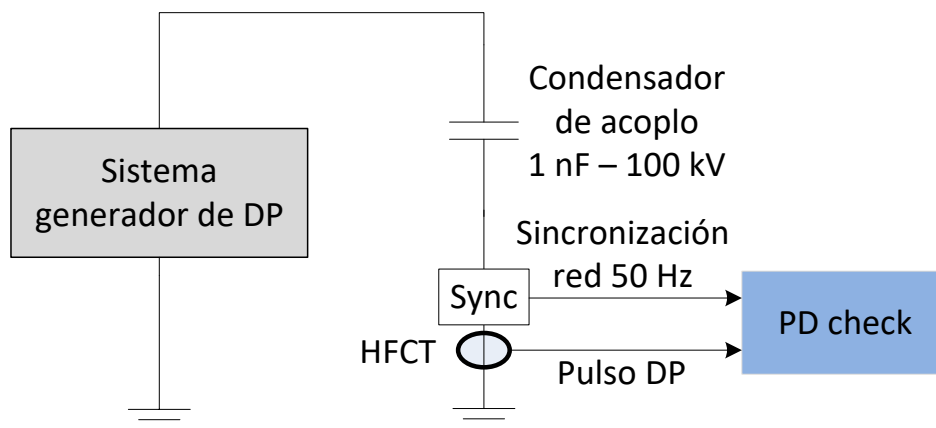


Figura 9. Esquemático del sistema de medida eléctrico de DP.

Para identificar las DP generadas durante cada experimento o cada período de observación, el sistema mide dos señales: ¹el pulso generado por la DP y detectado mediante una ferrita o *HFCT* (Transformador de corriente de alta frecuencia) que transforma la corriente que circula por la rama en una tensión, y ²la señal de red que proporciona el sincronismo entre el momento en el que se produce la DP y la fase del ciclo de red en ese momento.

Una vez obtenida una colección grande de datos, el sistema agrupa las medidas mediante mapas tiempo-frecuencia y, por último, utiliza técnicas *fuzzy* o de lógica difusa, en combinación con patrones PRPD de DP que ya tiene almacenados, para realizar la identificación de cada uno de los clústeres [14].

Al final de todo el proceso, el sistema *PDcheck* ofrece básicamente dos datos: los PRPD obtenidos en la medida y la probabilidad de que las señales medidas se correspondan a un tipo de DP o a otras fuentes, como ruido:

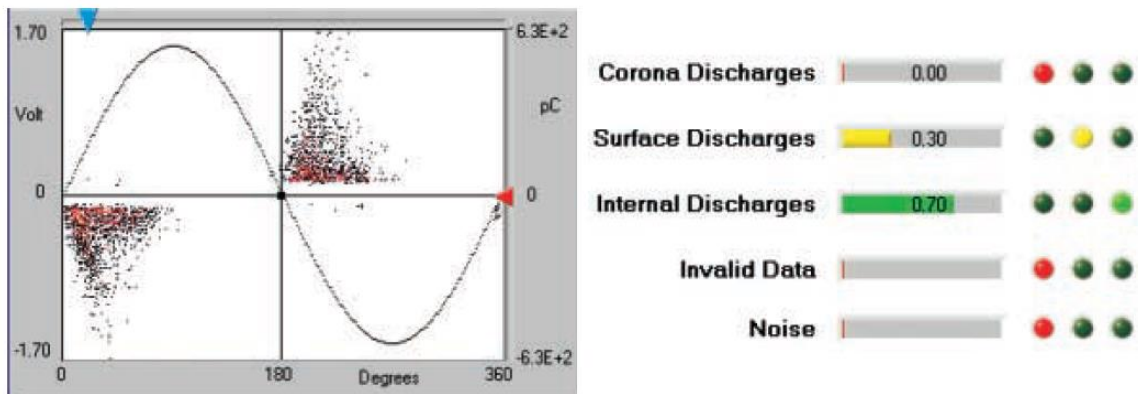


Figura 10. Resultado de un ensayo de DP. A la izquierda está el PRPD de la actividad de DP, y a la derecha la identificación de la lógica difusa de la actividad de DP [14].

En la imagen de la izquierda de la Fig. 10 se tiene un ejemplo del PRPD (en 3D) realizado en un ensayo: en el eje X se representa el instante del ciclo de red donde se produjo la DP, en el eje Y se representa la amplitud de la DP y en el eje Z se representa el número de eventos con las mismas características de ciclo de red y de amplitud de la señal (el eje Z es perpendicular a la pantalla y se representa mediante gama de colores).

En la imagen de la derecha se obtiene el resultado de aplicar la lógica difusa al PRPD del ensayo, dando como resultado un 30% de probabilidad de haber generado DP superficiales y un 70% de probabilidad de haber generado DP internas.

El objetivo de utilizar este equipo comercial en la plataforma experimental, que se va a presentar en el siguiente capítulo, es tener garantías de que se están midiendo DP y, además, del tipo deseado.

2.4 Procesamiento de señales generadas por descargas parciales

En este apartado se presentan las técnicas más relevantes de filtrado y procesamiento de las señales acústicas adquiridas con sensores PZT montados en el exterior de la cuba.

2.4.1 Técnicas de acondicionamiento

La detección de DP dentro de transformadores presenta las siguientes dificultades: la distorsión y la atenuación por propagación de la señal desde la fuente al sensor [22], el ruido y distorsión provocados por los diferentes caminos acústicos adoptados por la emisión acústica (propagaciones secundarias y rebotes) [55] y los ruidos propios por el funcionamiento de los distintos elementos de la máquina [16, 29] (por ejemplo, el ruido por magnetoconstricción del núcleo o ruido de Barkhausen en torno a 50 kHz o 60 kHz).

Para solventar estas dificultades cabe mencionar que el procedimiento comúnmente utilizado para detectar DP es mediante el análisis realizado por personal técnico entrenado [16]. En consecuencia, parte de las técnicas desarrolladas, o bien proporcionan herramientas de apoyo al experto en su labor (a través del acondicionamiento y filtrado de la señal), o bien proporcionan un procesamiento que incorpora parcialmente el conocimiento del experto [63].

Dentro del grupo de filtrado y acondicionamiento, nos encontramos el recomendado por la guía del IEEE para medir con PZT en el exterior de transformadores [16]. Se trata de un filtro paso banda entre 100 kHz y 300 kHz para trabajar dentro de las resonancias del sensor y, además, evitar aquellas frecuencias donde existe ruido como el anteriormente citado (ruido de Barkhausen en torno a 50 kHz o 60 kHz).

Existen otras técnicas de filtrado, como las técnicas wavelet [64], que también han sido aplicadas a señales eléctricas de DP [65, 66], donde una señal temporal es descompuesta en un conjunto de series temporales y cada una de ellas posee una parte de la información de la señal original. De esa manera, como veremos en el capítulo cuatro aplicado a señales acústicas, se pueden seleccionar aquellos componentes que poseen la información deseada.

En cuanto al uso de redes neuronales para identificar DP, queda lejos de los objetivos del presente trabajo. La técnica está basada en seleccionar un conjunto de parámetros de la señal que se desea detectar (puede ser la forma de onda temporal o el espectro característico de frecuencias) a partir de los cuáles se entrena a un sistema experto que pueda identificar o separar las señales provenientes de DP, respecto del ruido: ya sea a través de redes neuronales [67, 68], de máquinas vector soporte o SVM (*Support Vector Machines*) [39, 66, 69] o lógica difusa [70].

Por último, las DP no tienen por qué generarse de forma individual, sino que muchas veces se generan de forma simultánea, resultando en una mezcla que llega a los sensores como una señal distorsionada. Por su interés para poder separar las señales temporales de dos fuentes distintas emitiendo de forma simultánea, cabe citar el trabajo de Boya et al. que utiliza técnicas BSS (*Blind Source Separation*) y permite reconstruir la forma de onda de cada una de las fuentes [40].

2.4.2 Técnicas de localización

Si las técnicas de detección y filtrado han sufrido un gran avance en los últimos años, es interesante comprobar que en el ámbito de la localización acústica, a pesar de las dificultades prácticas de los métodos recogidos en la revisión del estado del arte hecha por Lundgaard en 1992 [22], el planteamiento en la norma IEC 62478 de 2016 sigue basado en resolver el sistema de ecuaciones para obtener las coordenadas de una fuente única y puntual (x_{fuente} , y_{fuente} , z_{fuente}) a partir de los tiempos de propagación desde la misma hasta varios sensores.

Si la referencia de tiempos es la señal eléctrica, entonces se considera que dicho instante t_{ref} constituye el tiempo cero en que ocurre la emisión acústica. En este caso se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones, simplificado con respecto a un sistema todo acústico [71]:

$$(x_{fuente} - x_{S1})^2 + (y_{fuente} - y_{S1})^2 + (z_{fuente} - z_{S1})^2 = (v_{sonido} \cdot T_{S1})^2 \quad (2.2)$$

$$(x_{fuente} - x_{S2})^2 + (y_{fuente} - y_{S2})^2 + (z_{fuente} - z_{S2})^2 = (v_{sonido} \cdot T_{S2})^2 \quad (2.3)$$

$$(x_{fuente} - x_{S3})^2 + (y_{fuente} - y_{S3})^2 + (z_{fuente} - z_{S3})^2 = (v_{sonido} \cdot T_{S3})^2 \quad (2.4)$$

Estas ecuaciones describen esferas de radios R_i cuyo origen se encuentra en los puntos $(x_{si}$, y_{si} , $z_{si})$ que es la posición donde se ubica cada uno de los tres sensores acústicos de medida. El radio de cada esfera responde a la siguiente ecuación:

$$R_i^2 = (v_{sonido} \cdot T_{Si})^2 \quad (2.5)$$

Gráficamente el problema se describe como en la Fig. 11.

2.4 Procesamiento de señales generadas por descargas parciales

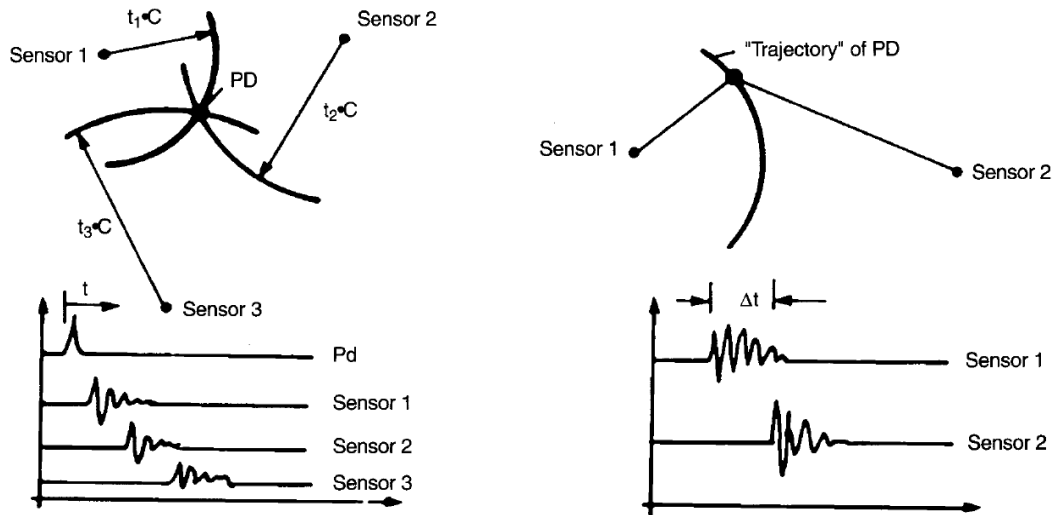


Figura 11. Localización de una DP mediante triangulación por medida del tiempo de vuelo [22]:

A la izquierda los tiempos de vuelo se calculan con referencia eléctrica ($t_{ref} = 0$) y

a la derecha con referencia sólo acústica ($t_{ref} \neq 0$)

Una vez planteadas las ecuaciones, éstas se pueden resolver por técnicas iterativas o por técnicas GPS [27].

Sin embargo, esta técnica, a pesar de estar estandarizada, no se ajusta bien a las condiciones de localización en sistemas papel-aceite. El principal problema es establecer la velocidad de propagación desde la fuente hasta el sensor. Esto se debe a dos motivos: el primero es que el medio no es homogéneo, por lo que su velocidad de propagación cambia por diferentes caminos; en segundo lugar, a pesar de que las velocidades de propagación del sonido en cada medio son conocidas, existen condicionantes posteriores a la puesta en marcha de la máquina que hacen que difieran de sus valores nominales y de sus características iniciales [72].

Adicionalmente, debido a la distorsión provocada por las múltiples señales que llegan al sensor, es difícil determinar el instante inicial de la señal directa en cada uno de los sensores, lo que acumula errores y produce desviaciones en la medida de tiempos de propagación a partir de la cual se calcula la localización.

Capítulo 3

Plataforma de generación y medida de descargas parciales

3.1 Introducción

El objetivo del siguiente capítulo es presentar la plataforma de ensayos diseñada, específicamente, para estudiar las emisiones generadas por descargas parciales (DP) en sistemas aislantes papel-aceite en entornos de alta tensión y comprobar si existe una correlación entre las medidas y los daños sufridos por el papel.

Como ya se ha comentado en el capítulo del estado del arte, el sistema está diseñado acorde a las especificaciones de la norma IEC 60270 [5] y está diseñado para controlar en la medida de lo posible la actividad y el tipo de DP que se generan.

El capítulo se divide en cuatro apartados. En primer lugar, se presenta la plataforma de ensayos y cómo se controla la generación de DP. Después se presentarán los sistemas

de detección acústica y eléctrica. En el tercer bloque se presentan el sistema de adquisición y, por último, se muestra un registro de algunas de las señales capturadas con el sistema de adquisición.

3.2 Generación de descargas parciales

3.2.1 Sistema de generación controlada

El sistema de generación y medida ha sido diseñado de forma conjunta por investigadores del Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser y del grupo de Diagnóstico de Máquinas Eléctricas y Materiales Aislantes para ser utilizado en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT), todos ellos ubicados en la Universidad Carlos III de Leganés.

Para diseñar la plataforma de generación se ha tenido en cuenta que cumpliera con la norma internacional IEC 60270 [5]. En esta norma, entre otras cosas, se describen los circuitos de ensayo para la generación y medida de DP y proporciona, además, indicaciones sobre los procedimientos de ensayo.

La plataforma está diseñada para cumplir dos requisitos fundamentales: ¹poder generar dos tipos de descargas parciales (internas y superficiales) y ²poder detectar y estudiar las señales acústicas y eléctricas generadas por las DP.

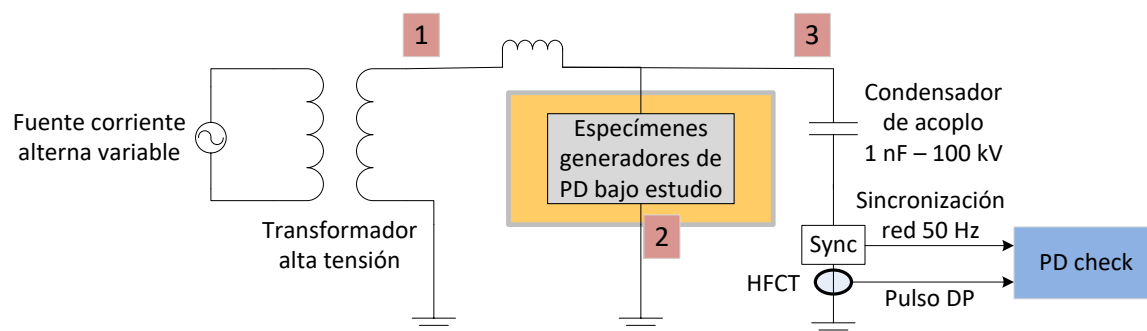


Figura 12. Esquemático del sistema generador de DP.

El sistema consta de tres partes como se puede apreciar tanto en el esquemático (Fig. 12) como en la fotografía (Fig. 13): por un lado, tenemos un sistema de excitación

que aplica una tensión en corriente alterna al espécimen o especímenes generadores de las DP bajo estudio (1); por otro lado, tenemos una cuba de PMMA llena de aceite de transformador donde se introducen los especímenes donde se generan las DP bajo estudio (2); y, por último, tenemos en paralelo el sistema de medida eléctrico *PDcheck* que comprueba que se están generando DP en los especímenes (3).

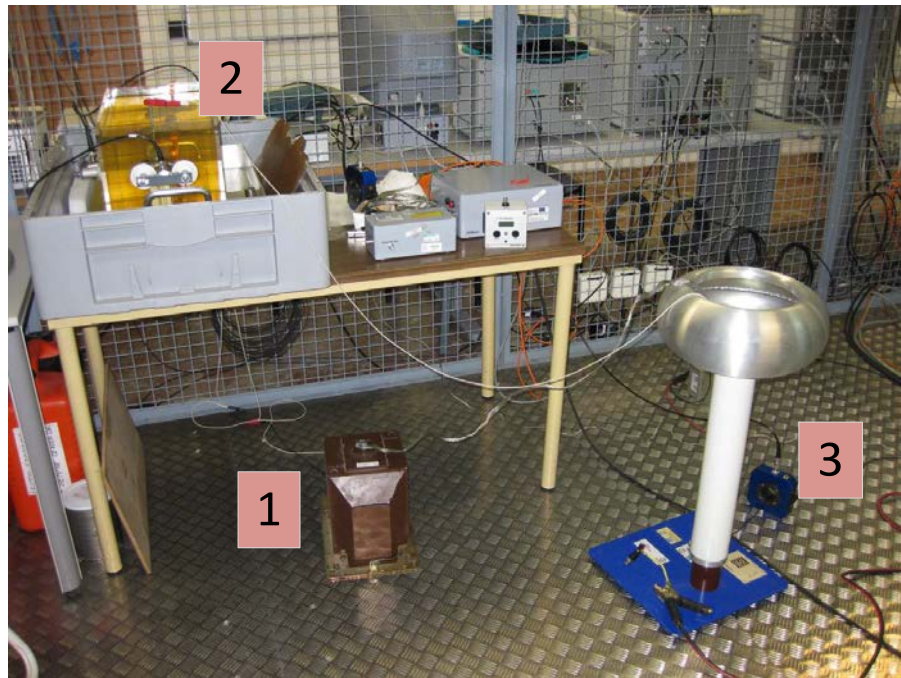


Figura 13. Fotografía de la plataforma real de ensayos en el LINEALT.

El sistema de excitación (1) consta de una fuente de alta tensión variable en corriente alterna de 50 Hz que se utiliza para regular la tensión de excitación, y un transformador para elevar la tensión generada por la fuente variable hasta el valor deseado en la excitación. De esta forma se obtienen empíricamente las tensiones a partir de las cuales aparecen DP mediante la subida controlada de la tensión (PDIV o *Partial Discharge Inception Voltage*) y las tensiones a partir de las cuales se extinguen (PDEV o *Partial Discharge Extinction Voltage*).

En esta tesis el cálculo del PDIV y del PDEV se ha utilizado para el control del experimento y para generar DP de forma individual. En general, cuando la tensión de excitación está cercana al PDIV se generan DP individuales (espaciadas en el tiempo), mientras que a valores de tensión mayores del PDIV las DP dejan de ser sucesos aislados y aparecen agrupadas en un corto espacio de tiempo.

En cuanto a la estructura donde generar DP (2), tenemos una cuba de PMMA llena de aceite mineral donde se introducen los especímenes. Los criterios utilizados para construir la cuba de PMMA en vez de metálica (como las industriales) han sido: ¹manejabilidad y transportabilidad (se busca una cuba de tamaño pequeño y ligera), ²transparencia visual (que permita una mejor visibilidad del sistema) y una mayor transparencia a emisiones acústicas y electromagnéticas (para facilitar la observación exterior de las DP mediante técnicas acústicas y UHF).

Los especímenes para generar DP son una parte importante del sistema de generación, ya que su diseño influye directamente en el tipo de DP generada y su actividad.

El último elemento del sistema de generación (3) es una rama en paralelo a la plataforma de generación, donde se ubica el sistema comercial de medida de DP *PDcheck* de TechImp Systems S.r.l. Este sistema se utiliza para comprobar la actividad de DP e identificar de qué tipo son mediante la medida eléctrica y de la fase de la tensión de excitación [14].

Una vez presentada la plataforma de ensayo, se describen en detalle los especímenes de generación utilizados.

3.2.2 Especímenes papel-aceite

La DP es una descarga eléctrica localizada que cortocircuita sólo parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede ser o no, adyacente a un conductor. Existen tres tipos de DP: corona, internas y superficiales. En este trabajo se han preparado dos tipos distintos de especímenes para generar DP: superficiales e internas. Se ha optado por no recoger en el presente estudio las DP tipo corona; primero porque no se presentan en entornos papel-aceite, sino que atacan únicamente al aceite [5] y segundo porque a nivel acústico tienen características bastante similares a las DP superficiales (Tabla 1).

Para estudiar las DP internas y superficiales, se han preparado diferentes estructuras que pueden ser colocadas según se desee dentro de la cuba de aceite y conectadas en paralelo al sistema de medida *PDcheck*. De esta manera, se espera poder simular, por ejemplo, las tres fases de un transformador o estudiar la posición óptima de los sensores acústicos.

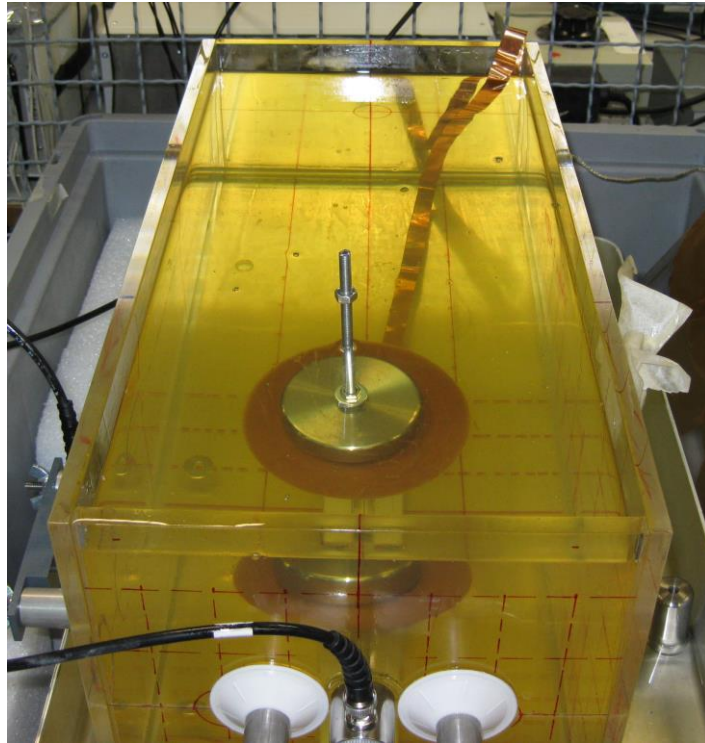


Figura 14. Fotografía del sistema generador de DP internas.

Los materiales empleados para crear las estructuras (Fig. 14) son soportes metálicos de diferentes alturas para poder regular la posición de los especímenes, aceite de transformador nuevo, discos y puntas metálicas que se usarán como soporte y como conductores y, por último, papel de transformador no envejecido que es sumergido previamente en aceite para que se impregne antes de realizar las pruebas.

Por último, cada espécimen puede conectarse en paralelo o de forma independiente al transformador de alta tensión, de tal manera que el sistema de generación es configurable conforme a las necesidades del estudio a realizar.

Las DP internas se generan colocando papel recién impregnado en aceite entre dos discos conductores metálicos, y el conjunto se sumerge en aceite como se muestra en el esquema de la Fig. 15. Dentro de las capas de papel quedan confinadas microburbujas de gas donde se generan las descargas. Generalmente estas burbujas se encuentran distribuidas por todo el aislante, así que se espera una actividad dispersa.

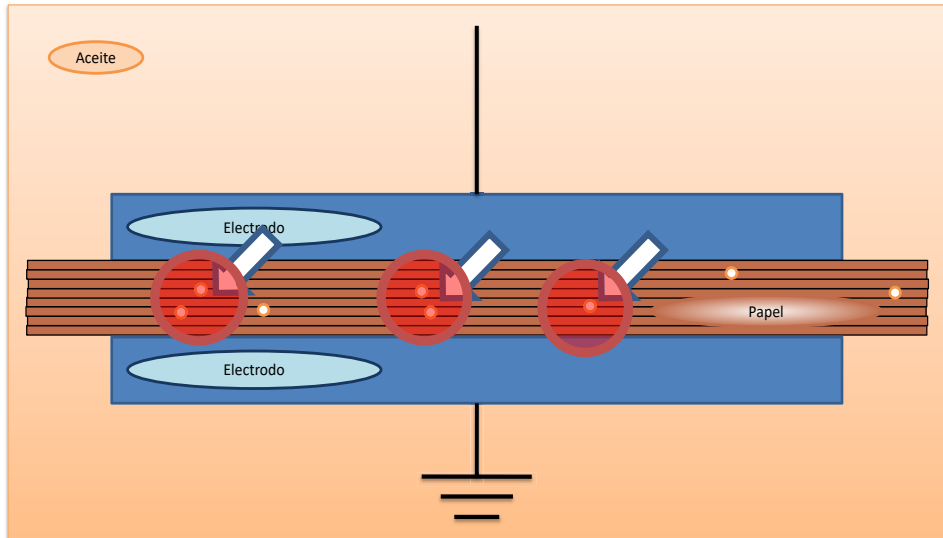


Figura 15. Esquemático del sistema generador de DP internas.

Con el esquema presentado para este tipo de descargas, se esperan las siguientes características: ¹carga desplazada de baja magnitud (entre 5 y 100 pC), ²actividad dispersa (por existir varios focos) y ³emisión acústica confinada. Las implicaciones de estas características y las consecuencias sobre la medida se estudian en los capítulos posteriores.

Las descargas parciales superficiales (Fig. 16) se generan colocando una punta conductora sobre una capa de varios papeles impregnada en aceite. La capa de papeles tiene un diámetro pequeño para asegurar que no cubre completamente el electrodo inferior con forma de disco y, de esta forma, permitir que la descarga contornee el papel en vez de generarse de forma interna.

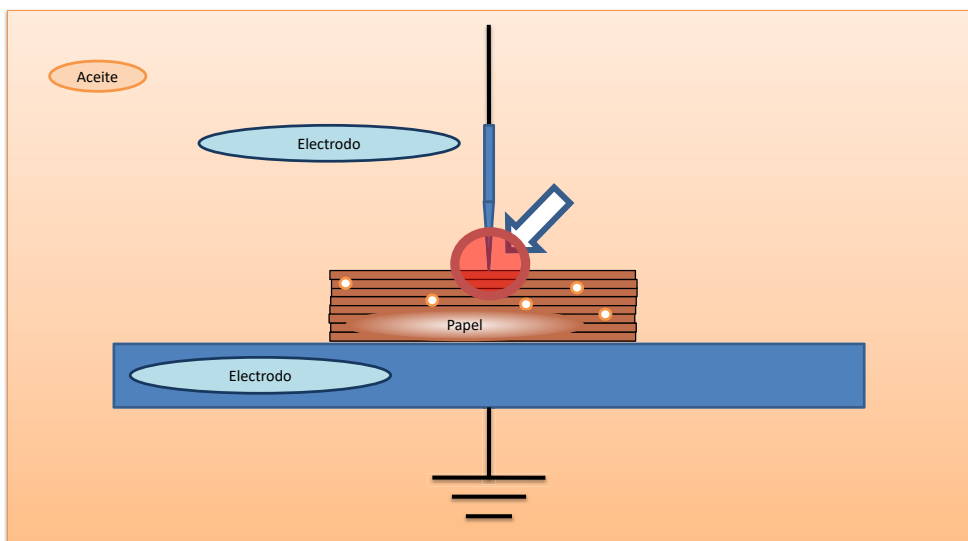


Figura 16. Esquemático del sistema generador de DP superficiales.

Las características esperadas para este tipo de descargas son: ¹carga desplazada de mayor magnitud que las internas (superior a 100 pC), ²actividad localizada en torno a la punta y ³emisión acústica libre.

Por todo lo anterior, aunque no se puede identificar de forma individual cada emisión acústica asociada a una DP, sí que es posible identificar los fallos generados en el aislante mediante un estudio de la actividad detectada y su localización.

3.3 Sistemas de medida eléctrica y acústica

Una vez diseñada la parte de generación de DP, el siguiente paso es planificar la detección de las distintas emisiones asociadas, para obtener información sobre el daño que se está originando en el aislante.

En el presente trabajo se ha optado por una medida conjunta de las señales eléctricas y acústicas. El motivo de esta elección viene recogido en la Tabla 2: la señal eléctrica nos informa del instante de generación de la DP y del tipo, mientras que la señal acústica da información de la localización donde se está produciendo el fallo.

Antes de entrar en detalle con las medidas acústicas y eléctricas, conviene comentar que la plataforma de ensayos también se diseñó de tal manera que se pudieran abordar otras líneas de investigación en la detección de DP. Dichas líneas son: ¹el desarrollo de sensores de fibra óptica (FO) montados en el interior de la cuba [56], ²el uso de cámaras térmicas, ³la medida de DP utilizando antenas UHF [73] y ⁴la medida de la señal eléctrica utilizando sensores eléctricos inductivos [74] en vez de la medida con ferritas.

3.3.1 Sistema de detección eléctrica

El sistema de detección eléctrico consta de una ferrita o transformador de corriente de alta frecuencia *HFCT* (*High Frequency Current Transformer*) que es sensible a la magnitud de corriente que circula por el cable que abraza en la banda entre 1 y 80 MHz (Anexo A.II.3).

CAPÍTULO 3: Plataforma de generación y medida de descargas parciales

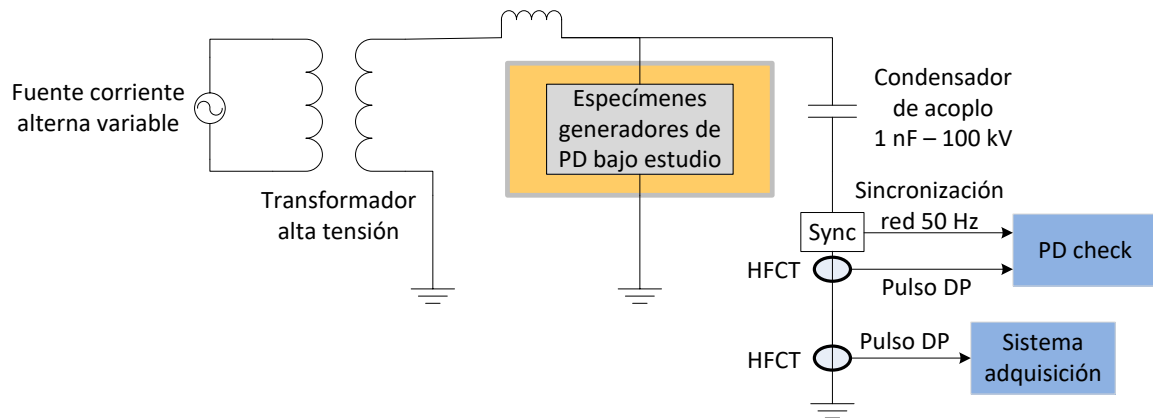


Figura 17. Esquemático del sistema generador de DP con detección eléctrica.

Una de las ventajas de medir la corriente eléctrica de esta forma es que se puede relacionar la carga desplazada por la DP con la amplitud de la señal medida por el sensor *HFCT*. Para poder realizar esta calibración, se utiliza un sistema que inyecta pulsos calibrados en el sistema de 5, 20, 100 y 500 pC y se calcula la amplitud de la señal respuesta a la salida del *HFCT*.

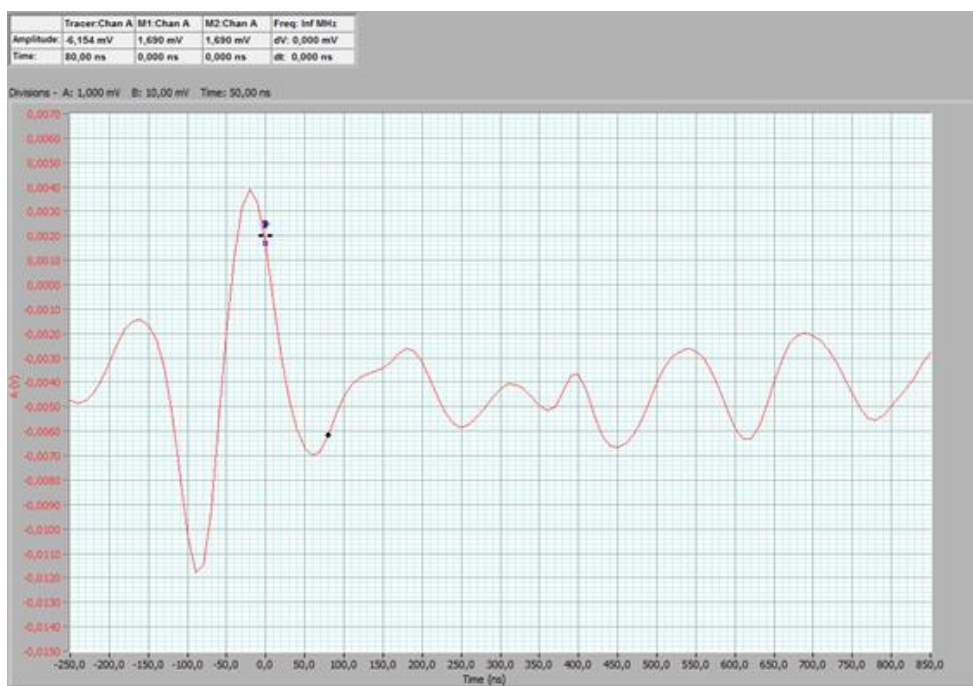


Figura 18. Ejemplo de señal detectada con el HFCT a una carga inyectada de 5 pC.

Una vez inyectadas las medidas de calibración en el sistema se puede calcular la respuesta a la salida del *HFCT* en función de la carga.

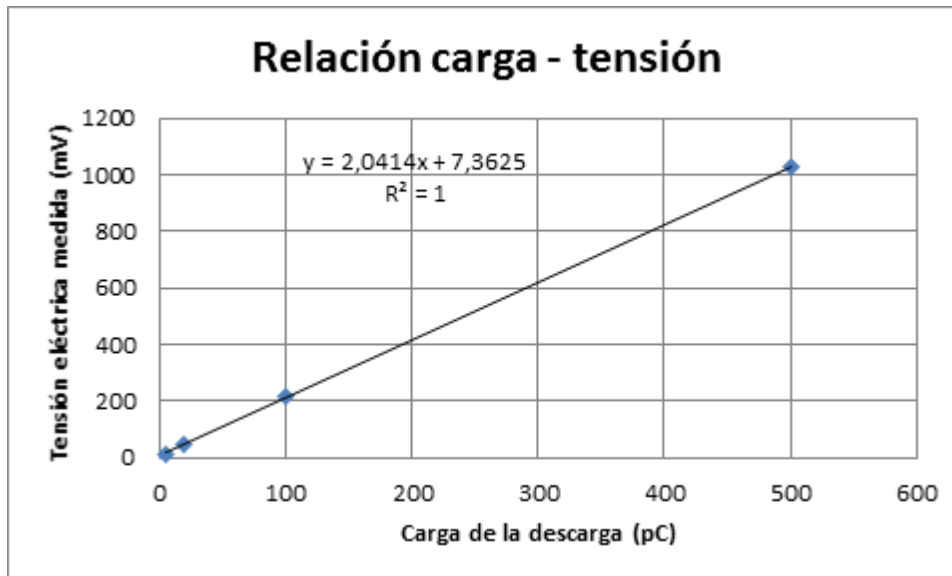


Figura 19. Ejemplo de calibración entre la amplitud medida y la carga de la DP.

En principio, la calibración resulta de interés para poder estudiar la carga aparente o magnitud de las DP detectadas; sin embargo, esta relación no se ha conseguido demostrar para la medida acústica [6].

Debido al interés por relacionar las magnitudes eléctricas y acústicas (e incluso UHF), se han presentado varios trabajos relacionados, pero ninguno de ellos ha arrojado resultados concluyentes (ni en estudios propios [46, 75], ni en los estudios realizados por terceros [45, 76]). Esto se debe a que la señal acústica detectada no sólo depende de la carga desplazada por la DP que la genera, sino que existen otros factores, como el camino acústico de propagación, que impiden realizar una relación a través de un único parámetro como en el caso eléctrico.

3.3.2 Sistema de detección acústico

3.3.2.1 Descripción general del sistema acústico de medida

El sistema de detección acústico está diseñado para ajustarse a la banda de emisión de las DP en sistemas aislantes papel-aceite y no interferir en el funcionamiento de la máquina; de tal modo, que pueda utilizarse en línea sin necesidad de desconectar el equipo bajo estudio.

El esquema general para un sistema de adquisición simultánea de medidas internas y externas es:

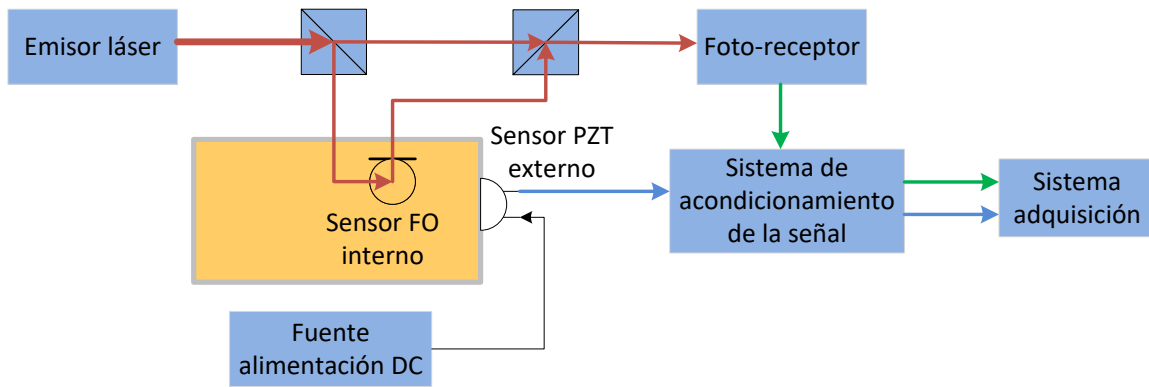


Figura 20. Esquemático de un sistema de detección acústico de DP interno y externo

El esquema representa un sensor interferométrico de fibra óptica (FO) para la medida interna de las señales acústicas y un sensor externo piezoeléctrico (PZT). Para el estudio de la emisión de las DP se puede combinar cualquier número de ellos, de tal forma, que se pueda localizar la señal y eliminar cualquier punto ciego debido a elementos internos del transformador.

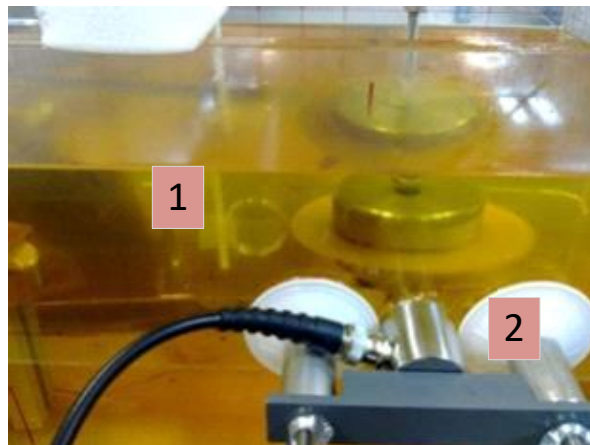


Figura 21. Fotografía de un experimento con medida acústica interna (1) y externa (2).

Para preparar el sistema, se ha tenido en cuenta la guía del IEEE [16], donde se definen las características de las señales acústicas emitidas por la DP, así como se dan recomendaciones para la medida externa de las mismas.

3.3.2.2 Sensores acústicos externos piezoeléctricos

El sensor acústico externo utilizado en la plataforma de ensayos es un transductor piezoeléctrico (PZT) montado en la cara exterior de la pared de un tanque de aceite mediante fijaciones mecánicas. Este sensor está diseñado específicamente para la

detección de DP [16]. Para evitar que se formen cámaras de aire entre el sensor y la pared que atenúen la señal (Anexo A.I) se utiliza una sustancia acoplante (generalmente gel de glicerina o grasa de silicona) que facilita la transmisión acústica de la pared al sensor, aumentando de esta manera la señal que le llega al sensor.

Los sensores externos utilizados son modelo *R15I-AST* de la compañía Physical Acoustic Corporation (Anexo A.II.2), los cuales tienen las siguientes características: rango de operación (80 – 200) kHz, resonante a 150 kHz para señales longitudinales y 120 kHz para señales transversales, preamplificador de bajo ruido integrado de 40 dB, salida filtrada y adaptada a 50 ohmios de impedancia. La sensibilidad de estos sensores es aproximadamente 1 V/Pa teniendo en cuenta la etapa de pre-amplificación de 40 dB, que viene integrada con el sensor y se alimenta a través de un *Bias-Tee*.

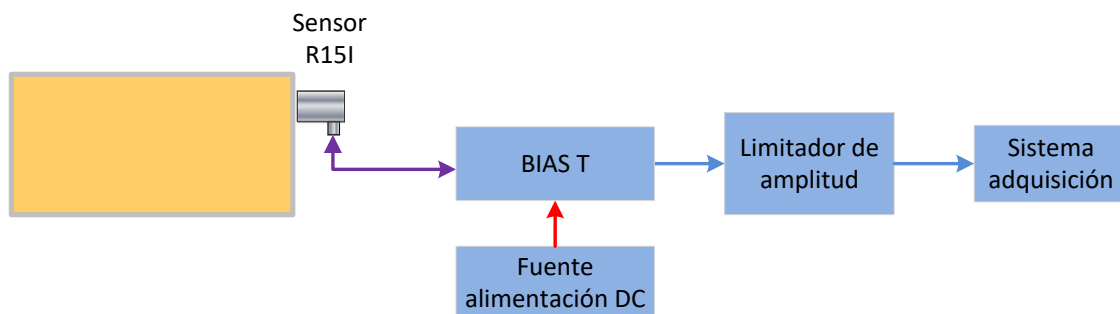


Figura 22. Esquemático de un sistema de detección acústico de DP basado en R15I.

El circuito de acondicionamiento del sensor PZT (Fig. 22) consta, por una parte, de una fuente de alimentación DC para alimentar la electrónica integrada del sensor (etapa preamplificadora y filtros). Dicha señal se introduce al *Bias Tee* que se encarga, por un lado, de inyectar a través del cable coaxial la alimentación DC para la electrónica integrada del sensor y, por otro lado, recoger la medida del sensor en AC. Esta señal AC, correspondiente con la medida del sensor, pasa después por un limitador de amplitud que consiste en dos diodos zener en anti-paralelo, para evitar sobretensiones que dañen el sistema de adquisición; y de ahí se envía al sistema de adquisición para su registro y posterior procesamiento.

3.3.2.3 Sensores acústicos internos de fibra óptica

Medir en la pared de la cuba metálica tiene una serie de desventajas como son: la distorsión provocada por las señales transversales propagadas a través de la cuba y la

atenuación. Si se pudiera medir en el interior de la cuba, se evitarían niveles de atenuación superiores a 17 dB (Anexo A.I) y además se tendría la certeza de que la primera señal que llega al sensor acústico es la que se propaga a través del camino directo.

Ahora bien, para poder medir dentro del transformador hay que cumplir ciertos requisitos: ¹el sensor debe poder trabajar adecuadamente en aceite a temperaturas por encima de 50 °C, ²el sensor debe ser inmune a la radiación electromagnética debida a los campos dentro del transformador y ³el sensor no puede interferir en el correcto funcionamiento del equipo (debe ser no-intrusivo). Un sensor de fibra óptica cumple con todos los requisitos mencionados.

Existen varios tipos de sensores basados en fibra óptica, entre ellos, los basados en interferómetros Fabry- Pérot [77, 78] y en interferómetros de Sagnac [79]. En el equipo de investigación se han diseñado y desarrollado sensores interferométricos basados en arrollamientos de fibra-óptica, para la detección de DP y su medida específica dentro de transformadores [56].

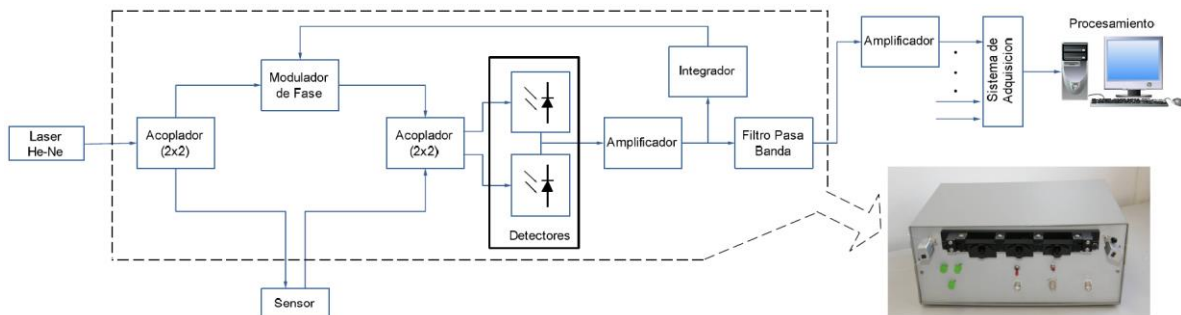


Figura 23. Diagrama de bloques del esquema optoelectrónico utilizado para la detección con sensor interno de fibra óptica [80].

El sistema que conforma el sensor interno de FO desarrollado dentro del proyecto de investigación (apartado 1.4) se presenta en la Fig. 23. El principio de medida del sensor de FO se basa en un interferómetro de tipo Mach-Zehnder. En su configuración más básica, este tipo de interferómetros se caracteriza por usar, en primer lugar, una fuente de luz coherente (en este caso, un láser de HeNe), cuya luz se introduce en una FO. Una vez confinada la luz en la FO se divide en dos caminos al 50% mediante un acoplador: una de las ramas se considera de referencia y la otra rama es donde se encuentra el sensor a introducir en la cuba. Posteriormente las dos ramas vuelven a fundirse en una sola mediante un acoplador al 50% donde los dos haces se vuelven a hacer uno e interfieren

entre sí. Finalmente, dicho haz interferente es convertido en una señal eléctrica por un fotodetector, la cual es registrada por el sistema de adquisición.

Con el objetivo de adaptar el sensor de FO a las necesidades específicas de la detección acústica de DP, el sistema incluye las siguientes mejoras. La primera mejora consiste en utilizar un módulo fotodetector diferencial formado por dos detectores en contrafase por lo que, además de eliminar el modo común, aumenta la sensibilidad.

La segunda mejora es la implementación de un sistema de estabilización. El objetivo de este sistema es reducir las perturbaciones de baja frecuencia, como las producidas por los cambios de temperatura y vibraciones, entre otros, y para mantener el interferómetro en una región lineal de funcionamiento con máxima sensibilidad (desfase óptico igual a $\pi/2$ rad). Para ello utiliza un actuador piezoeléctrico que modifica la fase óptica 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 activa). Con este actuador en particular, utilizado como modulador de fase, se pueden compensar hasta 50π rad para frecuencias inferiores a 200 Hz.

Las dos últimas mejoras se utilizan para ajustar la respuesta en frecuencia del sensor de FO y del sistema de acondicionamiento a la banda de detección de ondas longitudinales del sensor *R15I*. Por un lado, mediante acondicionamiento electrónico basado en una etapa de filtrado paso-banda entre 100 y 300 kHz.

Por otra parte, el diseño del sensor de FO se ajusta para optimizar la respuesta en la banda de frecuencias típica del sensor *R15I*, la cual está en torno a 150 kHz. El sensor consiste en un arrollamiento de FO (Fig. 24) cuyo espesor es de tal forma que la zona efectiva de detección corresponda aproximadamente a media longitud de onda acústica.

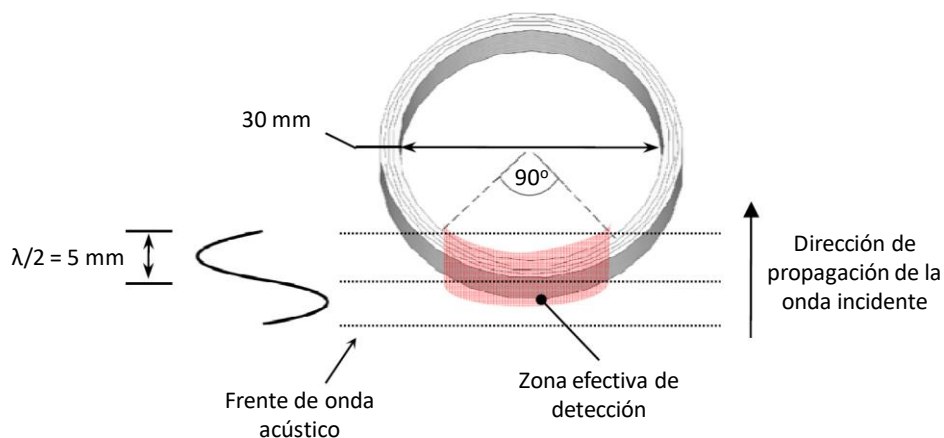


Figura 24. Esquemático sensor de fibra óptica [80].

Una vez presentado el sensor de FO, se muestra un ejemplo de las señales detectadas en la plataforma de ensayos usando dicho sensor y comparándolo con un sensor PZT.

3.3.2.4 Señales acústicas detectadas con sensor acústico externo (PZT) y con sensor acústico interno (FO)

Para comparar la respuesta de un sensor PZT con el sensor de FO se utilizó el esquema de generación de DP internas y superficiales presentado en la Fig. 25.

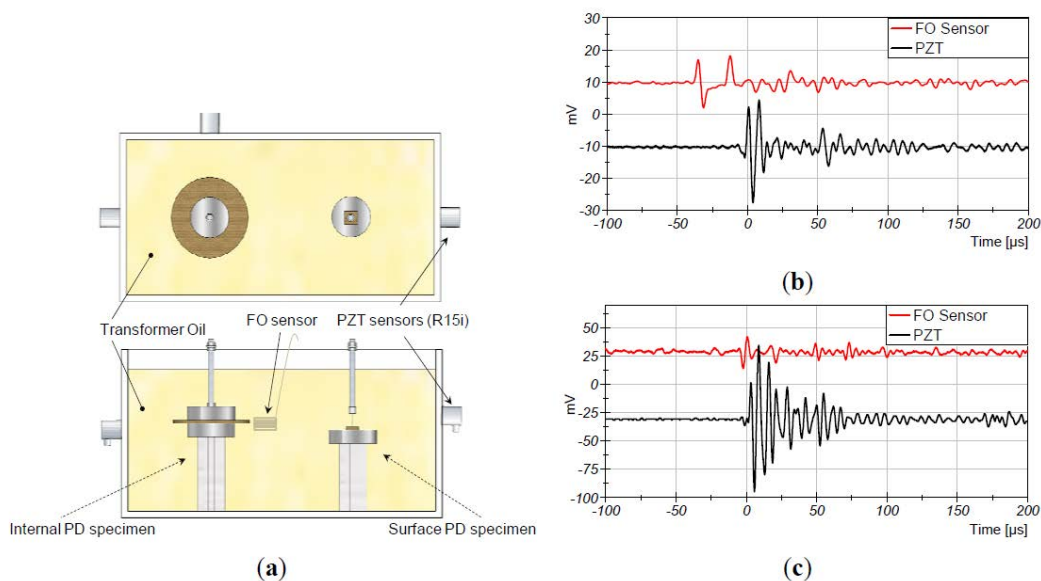


Figura 25. (a) Esquemático de la plataforma de ensayos; (b) registro de DP internas con PZT (negro) y FO (rojo) y (c) registro de DP superficiales con PZT (negro) y FO (rojo) [56]

En la Fig. 25 se muestran ejemplos de señales acústicas obtenidas con ambos tipos de sensor. Los niveles detectados por el sensor de FO son menores que los detectados por el sensor de PZT acoplado a la pared de una cuba de PMMA. Aunque los valores de la FO son menores, hay que tener en cuenta que en las medidas presentadas la cuba es de PMMA y se espera una transmisión al sensor exterior del 76% frente al 2% de transmisión que se esperaría con una cuba metálica (Anexo A.I).

El sensor de FO puede ser utilizado como sustituto de la referencia eléctrica en entornos ruidosos [71]. Por otra parte, puede sustituir a los sensores PTZ en un sistema multi-canal de localización utilizando únicamente sensores internos de FO [52].

3.4 Sistema de adquisición y registro de datos

Para elegir el sistema de adquisición se tienen en cuenta el volumen de datos, el ancho de banda de las señales, los niveles de señal esperados y el tiempo de registro.

En las señales acústicas la banda de detección se encuentra ente 100 kHz y 300 kHz, mientras que en las señales eléctricas se encuentra por encima de 1 MHz. Por otro lado, a la hora de calcular el tiempo mínimo necesario de adquisición, se tiene en cuenta la velocidad de propagación de las señales acústicas en el aceite y las dimensiones de la cuba. Si tomamos que $v = 1400$ m/s y las dimensiones de la cuba, obtenemos que una captura de 600 μ s es suficiente.

Con esta primera configuración se obtuvieron los primeros registros.

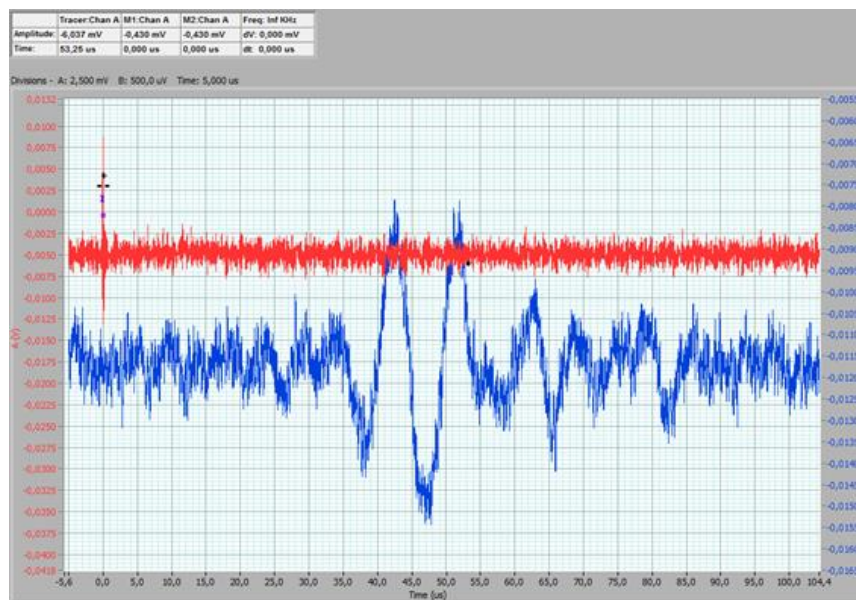


Figura 26. Primeras medidas experimentales de DP con dos canales: HFCT (rojo) y PZT (azul)

Adicionalmente, tras realizar las primeras pruebas experimentales, midiendo de forma simultánea con el sensor PZT y con el sensor eléctrico HFCT (Fig. 26), se observa que 100 MSps son suficientes para realizar una adquisición simultánea de la señal acústica con referencia eléctrica (la frecuencia central de señal eléctrica detectada se encuentra en el orden de varios MHz).

Otro de los requisitos del sistema es que debe ser capaz de capturar un ciclo de red completo (20 ms) a la frecuencia de muestro de 100 MSps, por lo que debe tener memoria suficiente para almacenar $2 \cdot 10^6$ muestras por canal.

Para localizar DP mediante triangulación por tiempos de vuelo, el sistema adquiere al menos cuatro canales (1 eléctrico y 3 acústicos) de forma sincronizada; el canal eléctrico es la referencia del instante en el que se genera la DP y a partir de él se calcula el tiempo de vuelo con la medida acústica de cada canal.

El último requisito que cumple el sistema de adquisición es incluir una herramienta flexible y potente de procesamiento de datos que permite aplicar técnicas de filtrado digital, localización y tratamiento estadístico de datos. La herramienta seleccionada para el procesamiento general de datos es Matlab[®] en entorno Windows, por lo que los datos se procesan en un PC.

El sistema de adquisición de datos elegido es el osciloscopio (con soporte Windows) *Cleverscope* modelo CS328-A (Anexo A.II.4). El módulo tiene dos canales de adquisición a 100 MSps con una capacidad de almacenar dos millones de muestras (unos 20 ms) por canal que son enviados al PC mediante un puerto USB 2.0. El módulo carece de un interfaz físico para su control; todo el control se realiza bajo una aplicación del fabricante, desarrollada en entorno Labview[®], llamada *Cscope*. Adicionalmente, cada módulo posee un puerto que permite sincronizar el disparo con otro módulo, de manera que se pueden sincronizar dos módulos para adquirir de forma simultánea con 4 canales.

Aunque no se trata en la presente tesis, en la actualidad, el sistema de adquisición ha evolucionado hacia una arquitectura PXI basada en módulos de adquisición de National Instruments y programación en instrumentación Labview[®] con pasarela a Matlab[®] [71].

3.5 Registro de señales y evento patrón

3.5.1 Registro de la actividad de descargas parciales internas y superficiales

Una vez diseñada, construida y configurada la plataforma de ensayos (Anexo A.II.1) se realiza un primer experimento para analizar y comprender la respuesta característica para una medición acústica realizada desde el exterior, tanto para DP internas como DP superficiales.

Se plantea la configuración experimental de la Fig. 27. En esta configuración tanto los especímenes como los sensores *R15I* se encuentran a la misma altura. Primero se excita la emisión individual de DP internas y, posteriormente, de DP superficiales; de esta forma se comprueba la fiabilidad en la clasificación del tipo de DP generada por parte del equipo *PDcheck*.

Las descargas se generan con una tensión de excitación cercana al PDIV correspondiente para garantizar una actividad baja y evitar el solapamiento de eventos acústicos.

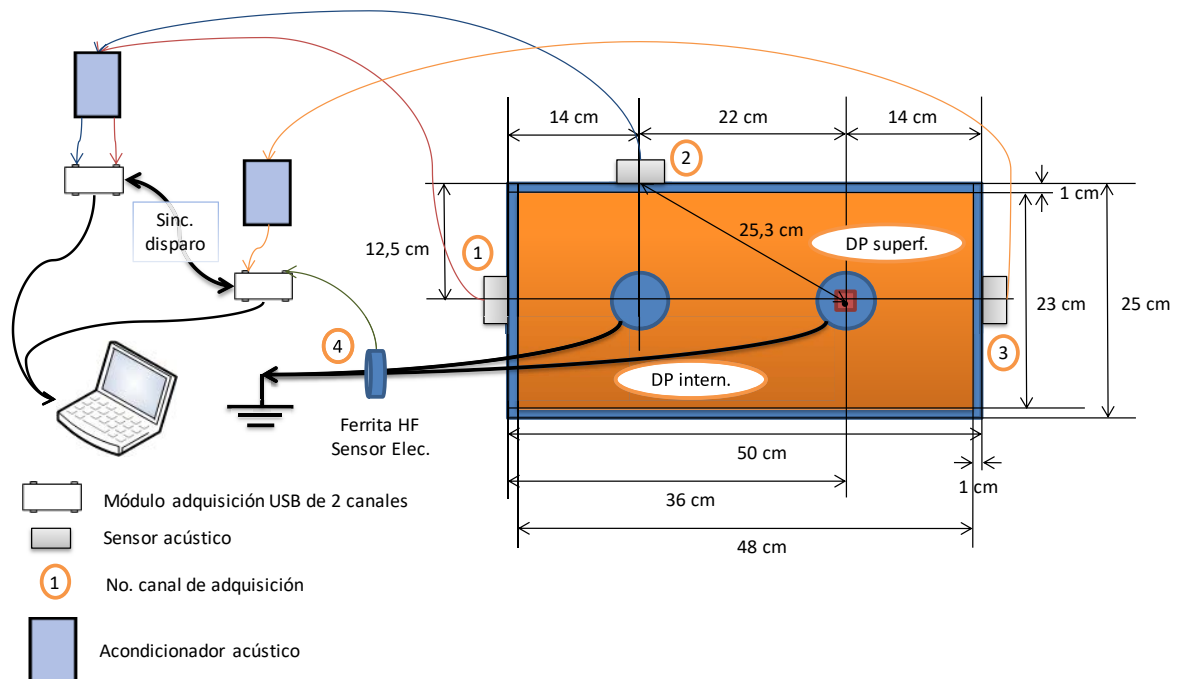


Figura 27. Configuración experimental de generación de DP

A continuación se muestra una adquisición directa; esto es, sin realizar ningún procesamiento a la señal. La Fig. 28 muestra el resultado obtenido para una DP interna.

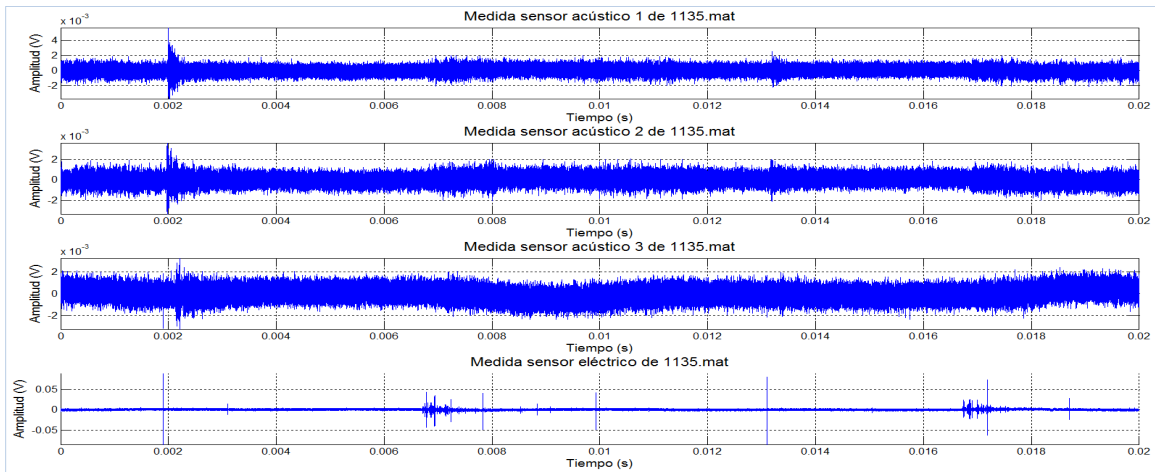


Figura 28. Medida de tres sensores acústicos PZT externos y un sensor HFCT eléctrico para la generación de DP internas

En la Fig. 28 tenemos la adquisición de un ciclo de red (20 ms) con la configuración presentada. De forma ideal, lo que esperamos es una señal eléctrica y posteriormente una respuesta acústica en cada uno de los sensores acústicos (ver ejemplo de la Fig. 26). Sin embargo, como se discute en el capítulo 2, la medida presenta una serie de dificultades que se muestran esquemáticamente en la Fig. 29 a partir de una adquisición completa.

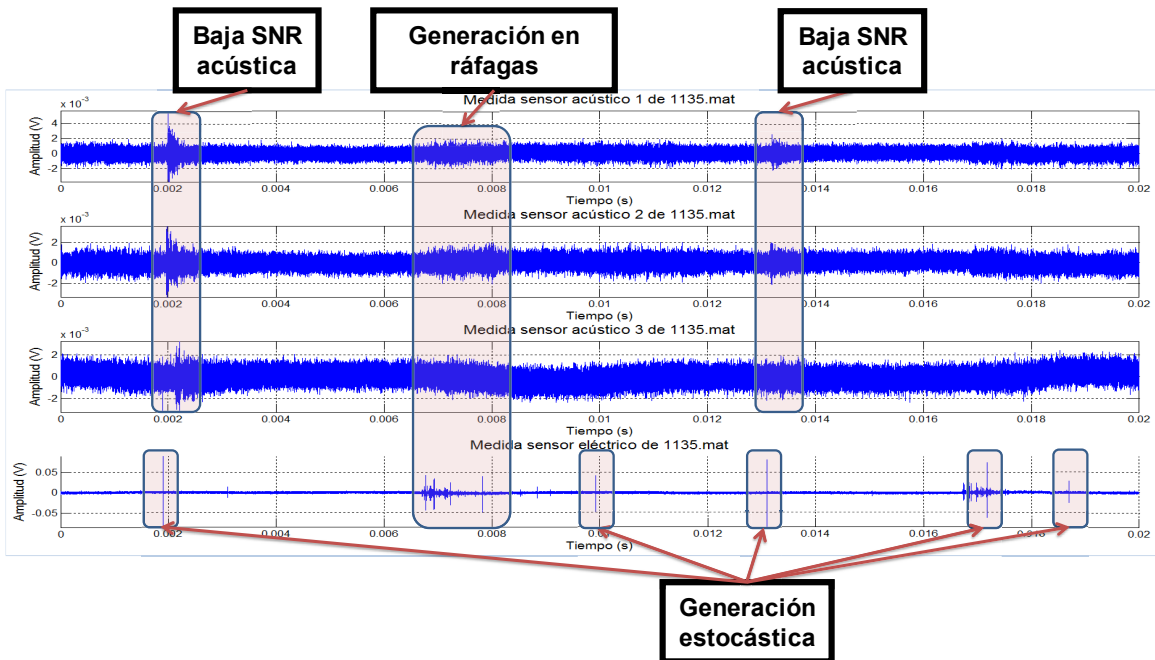


Figura 29. Medida de tres sensores acústicos PZT externos y un sensor HFCT eléctrico para la generación de DP internas

Es por tanto necesario procesar las señales adquiridas para obtener en cada uno de los canales una correcta detección de la señal correspondiente, todas ellas provenientes de una misma DP. Los objetivos de dicho procesamiento son:

- 1- acondicionar señales acústicas con una SNR (relación señal-ruido) baja;
- 2- intentar desagregar la información acústica superpuesta de distintas DP debido a que la duración de las señales acústicas es, a veces, mayor que el tiempo entre la generación de dos DP (generación en ráfaga);
- 3- realizar un acercamiento estadístico debido a que no se puede sincronizar la detección de DP bajo ninguna referencia de sincronismo establecida.

En cuanto a la detección de DP superficiales, se espera que las características de las señales sean ligeramente diferentes a las DP internas ya que, por un lado, se espera que la magnitud eléctrica sea mucho mayor (pudiendo generar pick-up eléctrico en los canales acústicos), además la señal acústica no está confinada entre electrodos y, por otro lado, las DP superficiales suelen generarse de forma individual más que en ráfagas.

A continuación, se muestra la captura de un ciclo de red para la generación de DP superficiales (Fig. 30):

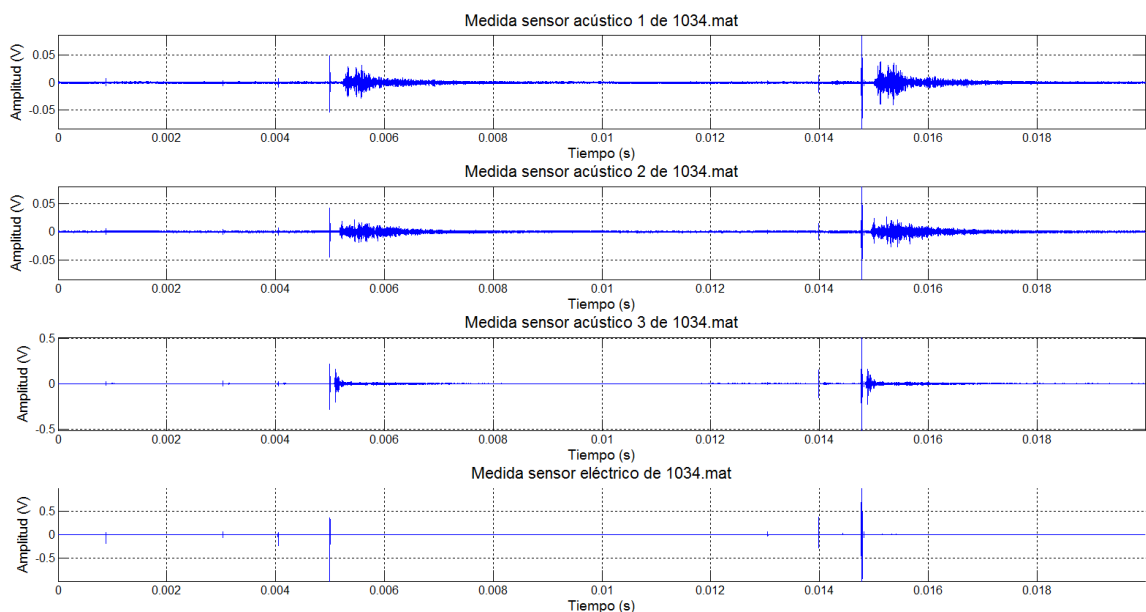


Figura 30. Medida de tres sensores acústicos PZT externos y un sensor HFCT eléctrico para la generación de DP superficiales

En el caso de las DP superficiales, encontramos que la magnitud eléctrica es 10 veces superior a las DP internas; de igual modo sucede con la magnitud acústica; no obstante,

las señales acústicas presentan una duración mayor en las DP superficiales que en las internas. En las DP superficiales, además, encontramos que existe pick-up de la señal DP eléctrica unas 10 veces inferior a la señal eléctrica DP medida con el *HFCT*. Por último, se observa que a pesar de que las DP superficiales tienen una magnitud mayor, son eventos más individualizados y menos propensos a generarse en ráfagas.

Una vez estudiadas las señales acústicas y eléctricas para DP internas y superficiales, podemos extraer unas características comunes que faciliten su detección e identificación en series temporales más largas. Para ello, definiremos el evento patrón en el siguiente apartado.

3.5.2 Definición de evento patrón

Se define un evento patrón, como un conjunto de señales experimentales (una por canal de detección) de las que se tiene garantía que corresponden a una DP. Este conjunto de señales tendrá unas características únicas (forma de onda, duración, retardo...) que facilitarán la detección e identificación de las señales DP frente a ruidos de magnitud similar.

Un ejemplo de evento patrón seleccionable es el presentado en la Fig. 30 anterior donde se distinguen con claridad dos eventos individuales con características comunes.

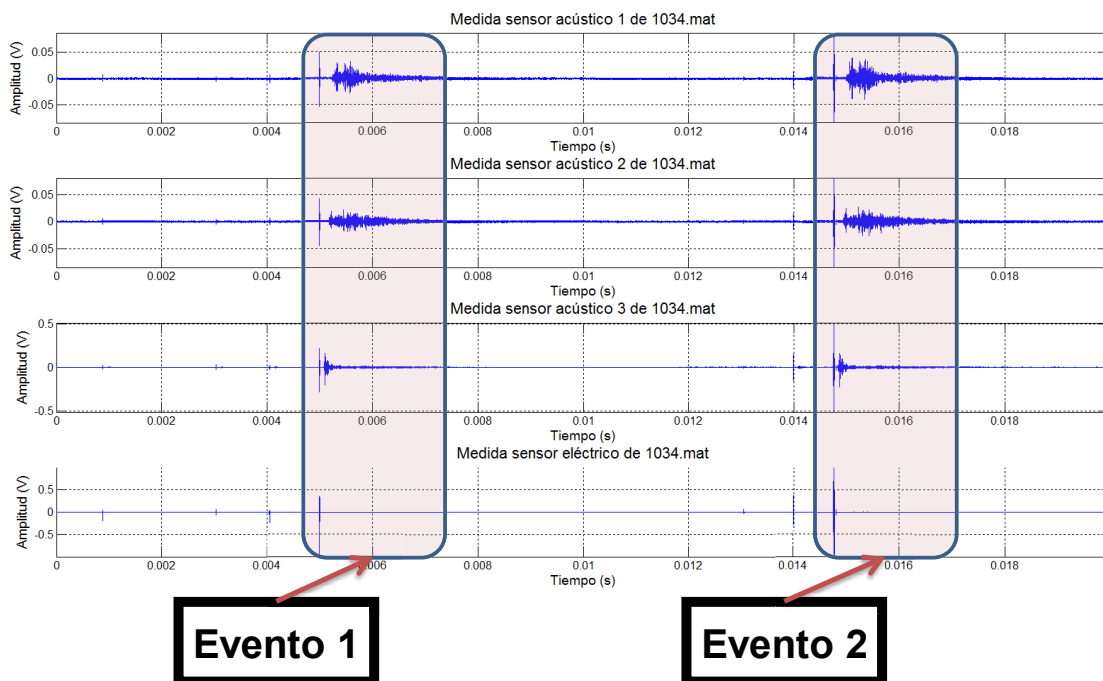


Figura 31. Dos eventos individuales con características muy similares

3.6 Daños ocasionados por las descargas parciales

En la Fig. 31 se puede ver cómo, a pesar de que el evento 1 y el evento 2 son de distinta magnitud y se producen en instantes distintos, poseen ciertas características comunes que les definen como señales generadas por una misma fuente de DP:

1- La primera característica asociada a la DP es la aparición de una señal eléctrica (canal 4), seguida de una señal acústica en el resto de los canales con un retraso asociado al tiempo de propagación. Si este patrón de tiempos se repite, estamos ante un defecto sistemático en el aislante.

2- Aunque la respuesta acústica para una misma DP es distinta en cada uno de los canales, al menos, dicha respuesta es sistemática entre las señales detectadas por un mismo canal para distintas DP. Esta repetitividad en la forma de onda temporal, puede ser utilizada para mejorar la detección.

Por lo tanto, si somos capaces de detectar y aislar un evento que claramente por sus propiedades está asociado a una DP, podrán utilizarse dichas características (forma de onda, retardos, propiedades espectrales, etcétera) para mejorar la detección de DP o su identificación.

3.6 Daños ocasionados por las descargas parciales

Durante la realización de medidas de DP, se sometió a un trozo de *pressboard* a un fuerte estrés hasta su ruptura para estudiar los daños que se pueden ocasionar. El espécimen utilizado fue una punta presionando el *pressboard*, el cual reside apoyado sobre un conductor plano. De esta forma, se pretende generar de forma simultánea DP internas y superficiales (Fig. 32).

El test duró una hora durante la cual se fueron observando la aparición mayoritaria de DP superficiales aisladas de gran tamaño. De vez en cuando aparecía alguna pequeña ráfaga de DP internas de baja magnitud. En los últimos 5 minutos empezó a aumentar la actividad de DP internas hasta que, finalmente, el sistema cortocircuitó.

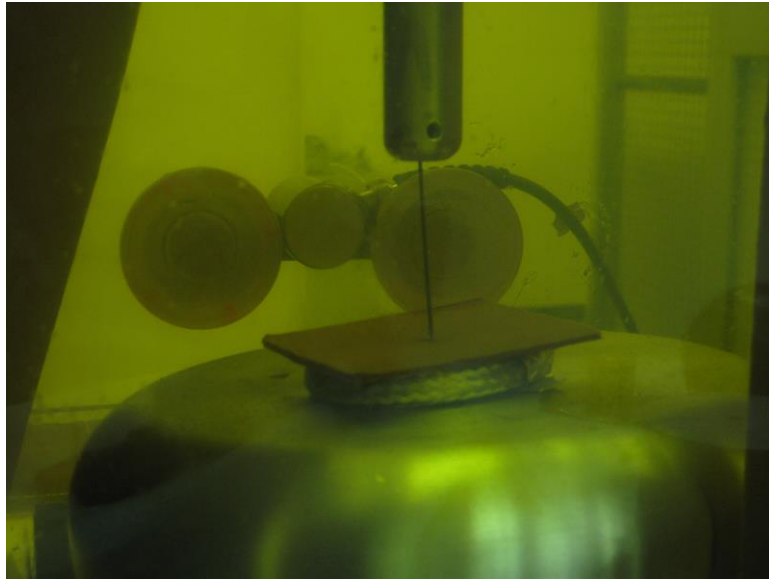


Figura 32. Fotografía del experimento de daño por DP

Cuando se analizó el *pressboard* se observaron los siguientes daños (Fig. 33):

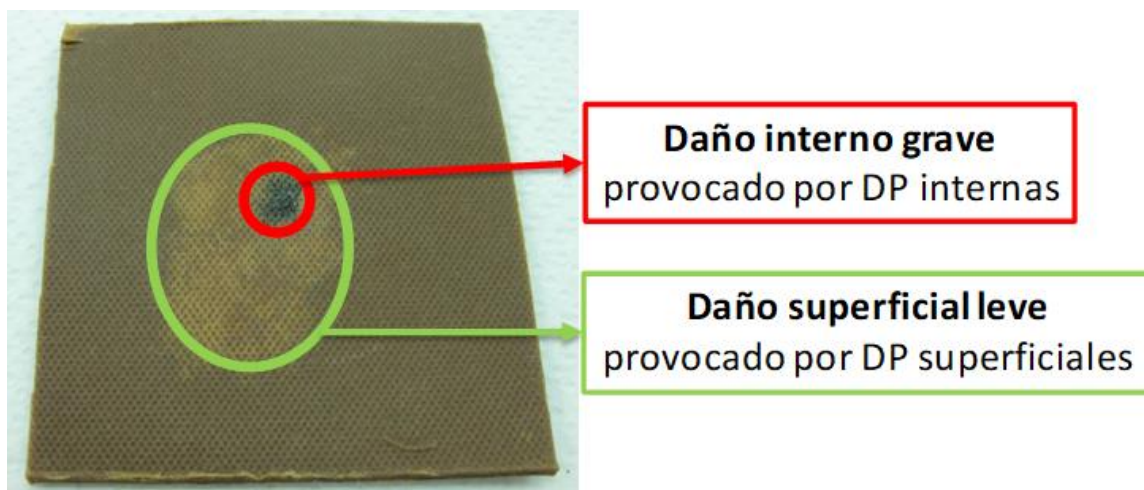


Figura 33. *Pressboard* dañado en el laboratorio.

En el papel aparecen tres zonas bien diferenciadas: ¹una zona de color marrón (que se corresponde a *pressboard* sin daño), ²una zona blanca (que se corresponde con un daño superficial donde se han generado las DP superficiales) y ³una pequeña región de color negro (que se corresponde con un proceso de combustión donde se generaron las DP internas).

Como se adelantó en la Tabla. 1, a pesar de su pequeña magnitud y de que la región dañada es más pequeña, al final fueron las DP internas las que dañaron de forma definitiva el aislante provocando el cortocircuito del sistema.

3.7 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una plataforma de ensayos compuesta por: ¹un sistema de generación controlada de DP, ²un sistema de detección acústico basado en sensores PZT externos, ³un sistema de detección eléctrico y ⁴un sistema de adquisición sincronizado capaz de registrar las emisiones de las DP.

El sistema de generación puede controlar el tipo de DP generadas, lo cual resulta de utilidad ya que permite caracterizar la respuesta de cada tipo de DP y clasificarla por su peligrosidad. Aunque las DP son un proceso estocástico, el sistema permite controlar, hasta cierto punto, el nivel de actividad de las descargas y la carga de las mismas a través de la fuente de tensión alterna variable.

En cuanto a los sistemas de detección, la plataforma está adaptada para medir con diferentes tipos de sensores. Para ello, se ha optado por una cuba de PMMA transparente frente a una cuba metálica industrial. Los tipos de emisiones que se pueden detectar son: eléctricas con sensores *HFCT*, eléctricas con sensores inductivos, acústicas en el interior y en el exterior, UHF en el exterior y medidas térmicas.

Para la medida eléctrica el sistema cuenta con un transformador de corriente o *HFCT* en paralelo al espécimen bajo estudio. Si se realiza un proceso de calibración, la amplitud de la señal eléctrica detectada es equivalente a la carga aparente de la descarga ya que existe una relación lineal entre ambas. Además, con el soporte del equipo *PDcheck* se puede hacer una identificación del tipo de actividad de DP que se están generando.

En cuanto a la medida acústica, el sistema puede emplear dos tipos de sensores: sensores PZT externos montados en la superficie de la cuba o un sensor interno de FO. Los sensores PZT se usan para triangular la señal y así poder localizar la fuente de DP. El sensor de FO está pensado para sustituir a la señal eléctrica como referencia; esto permitiría un sistema sólo acústico manteniendo la referencia cercana a la fuente de descargas. Como desventaja frente al sistema con referencia eléctrica, tenemos que la medida de la señal acústica de referencia no se corresponde al instante de inicio de la descarga, lo que complica las ecuaciones de localización. En la actualidad se están desarrollando sistemas multiplexados que permitirían la colocación de múltiples sensores acústicos en el interior sustituyendo a los PZT externos.

Para registrar las señales se usan dos módulos que se conectan al ordenador mediante puerto USB. Permiten adquirir de forma simultánea 4 canales a 100 MSps, durante 20 ms (un ciclo de red) con una resolución de hasta 14 bits. Este sistema es suficiente para hacer medidas orientadas a la localización de DP. Para ello se toma como referencia la medida eléctrica (su respuesta se considera instantánea con respecto al instante en que se produce la DP) y el tiempo de vuelo en la medida del resto de sensores acústicos.

Con el objetivo de analizar el sistema de generación y medida, se han realizado pruebas preliminares con DP internas y superficiales. Por un lado, se ha comprobado que las DP internas son de baja magnitud, además suelen presentarse en ráfagas de dos o más y su generación es aleatoria. Por otro lado, se ha comprobado que las DP superficiales son de mayor magnitud y suelen presentarse aisladas.

También se ha observado la existencia de eventos patrón; esto es, un conjunto de señales detectadas (una por sensor) que cumplen con los tiempos esperados para una emisión producida por los especímenes de ensayo. Aunque las formas de onda detectadas en los distintos sensores acústicos no se parecen entre sí, principalmente debido a los distintos caminos de propagación que tiene la emisión acústica de una DP hasta llegar a cada uno de los sensores, se espera que dicho evento patrón contenga información suficiente para detectar e identificar DP de menor magnitud.

Estudiadas las características de las señales de DP, se ha llevado al sistema aislante a una situación de estrés elevada para favorecer su ruptura. Analizando los daños en el aislante, se observa que, a pesar de que el daño global provocado por las DP superficiales es mucho mayor, finalmente las DP internas son las que provocan el fallo, principalmente porque la región dañada está confinada dentro del papel.

Como conclusión obtenemos que no basta con detectar señales de DP, sino que es necesario desarrollar un procesamiento capaz de detectar las DP internas de menor magnitud y estudiar cuándo empieza a haber efecto memoria en el papel; es decir, cuándo la actividad de DP internas comienza a concentrarse en una región pequeña del aislante, lo cual es síntoma de un inminente fallo.

En el siguiente capítulo se expondrán las diferentes técnicas empleadas para hacer reconocimiento de patrones y clasificar las señales detectadas.

Capítulo 4

Análisis y modelado de las emisiones generadas por una descarga parcial

4.1 Introducción

Las DP son procesos complejos de baja magnitud, que se pueden utilizar para predecir la ruptura del material aislante. Sin embargo, los primeros resultados con DP internas demuestran que es necesario un procesamiento capaz de detectar señales con baja SNR e identificar su tipo, así como que permita emparejar de algún modo las señales detectadas por los distintos canales, aunque se solapen entre si las de dos o más DP cuando la actividad es alta.

En este capítulo se evalúa un conjunto de técnicas que, aunque ya han sido presentadas de forma individual en otros trabajos (los filtros wavelet, el criterio de información de Akaike) [16, 27, 81], nunca habían sido analizadas como un sistema completo para la detección e identificación de DP.

Para ello, este capítulo se divide en tres grandes bloques. En el primer bloque se muestra la implementación de un filtro wavelet para el modelado e identificación de las distintas emisiones de DP. En el segundo bloque se presentan diferentes técnicas para detectar la señal transitoria y calcular el instante en el que se detecta. Y en el último bloque, se evalúan distintas combinaciones de técnicas, con el objetivo de seleccionar la más adecuada para esta aplicación.

4.2 Modelado de la señal

El objetivo del modelado de una señal conocida o patrón, es extraer un conjunto de características que permitan detectar e identificar otras señales de características similares, pero que debido a su baja SNR no se puede detectar directamente en la traza temporal mediante el establecimiento de un umbral de amplitud (o nivel de disparo).

Para ello, en primer lugar, se selecciona de forma convencional una señal claramente asociada a una DP (a la que llamaremos señal patrón del canal seleccionado) y se extraen de ella un conjunto de identificadores mediante el uso de filtros wavelet; posteriormente se utilizan dichos identificadores para analizar y filtrar series temporales largas (20 ms) con el objetivo de facilitar la detección de DP.

A continuación, se presenta la implementación de los filtros wavelet para el modelado de las señales eléctricas y acústicas.

4.2.1 Filtro wavelet universal

El filtro wavelet es un tipo filtro que consiste en reescribir una señal temporal como un conjunto de señales temporales, donde cada una de las cuales contiene una parte de la información espectral de la señal original [82].

La ventaja de reescribir una señal como un conjunto de señales, es que esta técnica se puede utilizar para hacer identificación de señales o un filtrado automático del ruido como veremos más adelante. Esta técnica se encuentra extendida en el campo de la detección de DP y se utiliza tanto en medidas eléctricas [83], en medidas UHF [84] y en medidas acústicas [81].

Una wavelet es una función que depende del tiempo $\psi(t)$, pertenece al espacio de Hilbert $L^2(\mathbb{R})$ de energía infinita, es de carácter oscilatorio normalizada y está centrada alrededor de $t = 0$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) \cdot dt = 0 \quad (4.1)$$

Gracias a estas propiedades de $\psi(t)$, se puede construir una base ortonormal en el espacio de tiempos, donde cualquier señal temporal se puede descomponer en un conjunto de series temporales, de tal forma, que cada una de estas series temporales actúe como un filtro paso banda.

Para ello, se construye la base de wavelets a partir de una wavelet madre $\psi(t)$. Una vez definida la wavelet madre, el resto de wavelets se generan a partir de la traslación y el cambio de escala temporal de la wavelet madre de la forma:

$$\psi_{\tau,s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (4.2)$$

Donde:

- I. τ es el factor de traslación, que se encarga de asignar la información contenida en la wavelet a un instante de tiempo específico.
- II. s es el factor de escala, que permite dilatar en el tiempo ($s > 1$) la función $\psi_{\tau,s}$ disminuyendo la frecuencia central f de dicha wavelet respecto de la frecuencia central f_0 de la wavelet madre.

Existe un conjunto de familias wavelet madre bastante amplio (Daubechies, Coiflets, Symlets, Morlet, Biortogonal...) y, como ya se ha comentado, cualquier serie temporal puede ser descrita mediante ellas.

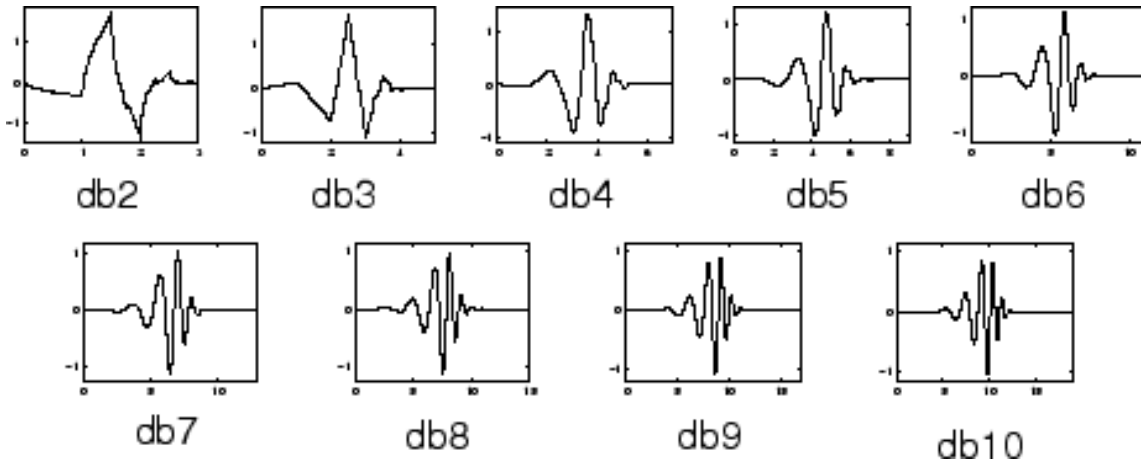


Figura 34. Ejemplo de wavelets madre de la familia Daubechies

Una vez seleccionada la wavelet madre, una señal temporal discreta y finita $f(t)$ se puede describir como la suma de un conjunto de series temporales finitas y discretas, donde cada una de estas series se comporta como un filtro paso banda. A este tipo de análisis se le denomina *transformada de wavelet discreta* o DWT (Discrete Wavelet Transform).

$$f(t) = A_n(t) + \sum_{i=1}^n D_i(t) \quad (4.3)$$

A los términos $D_i(t)$ se les denomina descomposiciones y actúan como filtros paso banda, excepto el término $D_1(t)$ que actúa como un filtro paso-alto. Al término $A_n(t)$ se le denomina aproximación y actúa como filtro paso bajo.

El término i define el nivel de descomposición, cuanto mayor sea su valor, mayor número de filtros paso-banda se construirán, desde frecuencias altas a frecuencias más bajas como se puede apreciar en la figura siguiente.

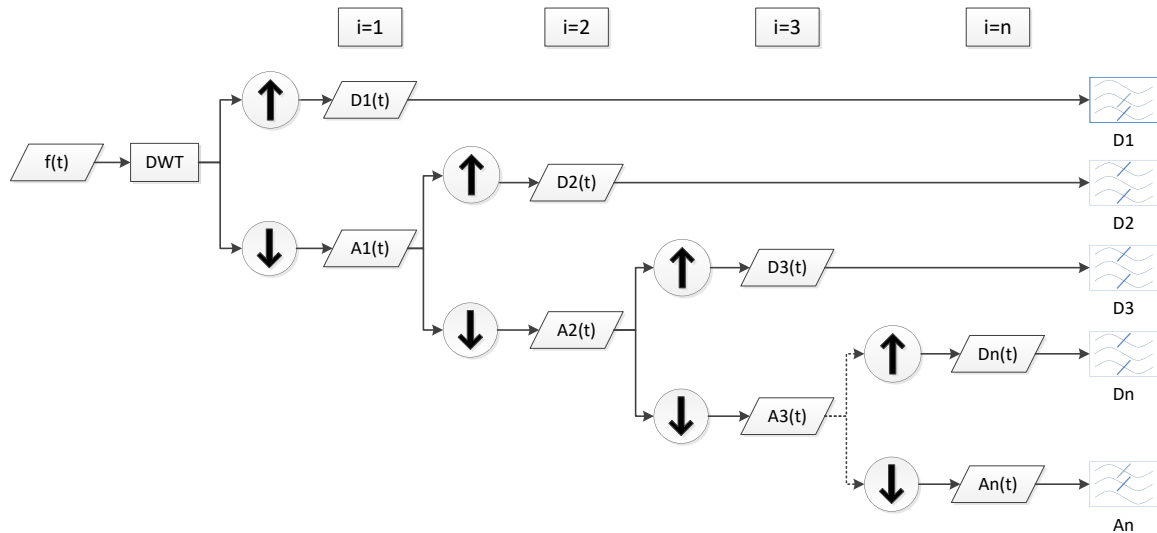


Figura 35. DWT en forma de árbol: una sucesión de filtros paso-alto y paso-bajo

Por tanto, cada una de las descomposiciones $D_i(t)$ y la aproximación $A_n(t)$ contendrá parte de la información espectral de $f(t)$.

Si escogemos aquellas componentes $D_j(t)$ que contienen la información espectral que buscamos y las sumamos, entonces podremos reconstruir la señal eliminando aquellas bandas que sólo contengan ruido. Para ello también será necesario escoger un valor de n lo suficientemente alto para asegurarnos de que el término $A_n(t)$, que contiene las frecuencias más bajas, se encuentra dentro del ruido.

Por último, se realizará la transformada wavelet discreta inversa o IDWT (*Inverse Discrete Wavelet Transform*), de tal forma que la señal filtrada tendrá la siguiente ecuación:

$$f'(t) = \sum_{j=l}^m D_j(t) \quad (4.4)$$

donde los valores de j (l, m) están comprendidos entre l y n y, además, no tienen por qué ser necesariamente correlativos si es que la información se encuentra en dos o más bandas separadas.

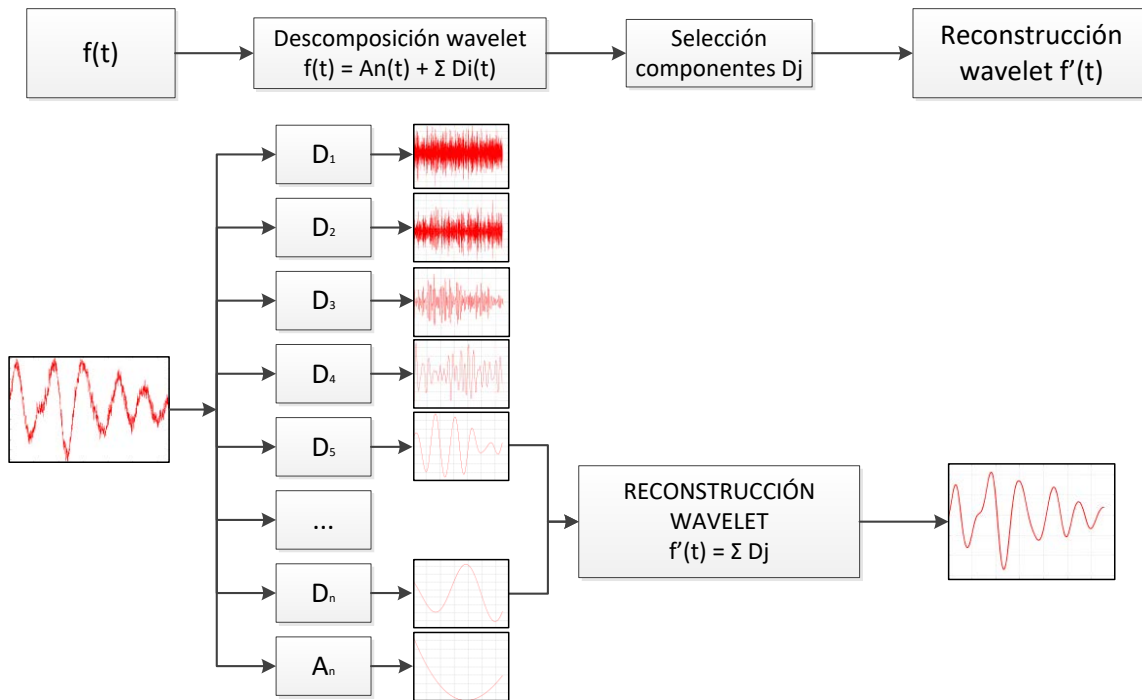


Figura 36. Ejemplo práctico de un DWT y filtrado correspondiente

Por lo tanto, para poder filtrar la señal $f(t)$ será necesario:

- I. realizar la transformada wavelet discreta (DWT) de la señal temporal a filtrar escogiendo para ello: ¹la wavelet madre que mejor se ajuste a nuestro sistema y ²seleccionar adecuadamente el orden de descomposición n para asegurarnos de que el término $A_n(t)$ sólo contenga ruido de baja frecuencia
- II. fijar un umbral para seleccionar aquellas $D_j(t)$ que contienen las bandas de interés de la señal temporal bajo estudio.
- III. realizar la transformada wavelet inversa (IDWT) para recuperar la señal filtrada.

Para seleccionar la wavelet madre se ha investigado en la bibliografía y se ha encontrado que la que mejor se ajusta a las características de las señales acústicas pertenece a la familia de Daubechies [27, 85].

En cuanto al criterio umbral de selección, se ha optado por el umbral universal [82] que tiene como ventaja su capacidad de filtrar automáticamente ruido blanco sin necesidad de fijar la banda espectral de detección. El principal problema de este tipo de umbralización es que no se aprovecha la información que se conoce del problema, lo que puede provocar la introducción de espurios no deseados; por ello en el siguiente apartado se presenta un filtro wavelet específico (FWE).

4.2.2 Filtro wavelet específico

El filtro wavelet específico funciona de forma similar al filtro wavelet universal utilizando los tres mismos pasos: ¹transformada wavelet, ²umbralizar componentes y ³transformada wavelet inversa. La diferencia radica en el paso 2 a la hora de umbralizar.

Mientras que en el filtro wavelet universal las componentes j se obtienen de forma automática por un umbral fijado de la señal bajo estudio [82], en el filtro wavelet específico se busca preservar la forma de onda de una señal patrón, o referencia, de una DP conocida. De esta forma, se garantiza que no se introduce ruido adicional monocromático que puede estar presente en la señal temporal bajo estudio, pero que no es representativo de la DP.

Otra ventaja de conocer las componentes j que contienen la información de la DP es que se puede limitar el número n de descomposiciones a

$$n = \max(j) \quad (4.5)$$

lo que reduce el tiempo de procesamiento al reducir el número de descomposiciones necesarias.

Para evaluar las componentes i de la DWT del patrón y seleccionar las componentes j del filtro, es necesario definir los parámetros que se utilizarán para cuantificar y comparar las descomposiciones $D_i(t)$.

Como se busca preservar la forma de onda, uno de los parámetros que se va a utilizar es el PMCC (*Product Moment Cross Correlation*) o coeficiente de correlación de Pearson o ratio (r), que mide la similitud en la forma de onda de dos señales discretas y finitas “f” y “g” mediante la ecuación:

$$PMCC(f, g) = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}) \cdot (g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}} \quad (4.6)$$

donde el PMCC adopta valores comprendidos entre (-1, 1) de tal forma que:

- PMCC = 1, si “f” y “g” tienen la misma forma de onda.
- PMCC = 0, si no existe ninguna relación entre “f” y “g”.
- PMCC < 0 si las señales están desfasadas π radianes entre sí.

Las ventajas de usar el PMCC son: ¹que su valor es independiente de la energía y su valor absoluto está normalizado entre (0, 1) y ²los valores negativos (-1, 0) nos informan de que ambas señales están en contra fase.

La desventaja de utilizar el PMCC es que, al ser independiente de la energía, puede suceder que una componente $D_i(t)$ tenga un alto valor de PMCC al compararla con la señal original, pero su aporte de energía a la reconstrucción sea ínfimo.

Por ello, para analizar y comparar la energía de cualquier componente wavelet $W(t)$ respecto de la señal original $f(t)$ se define la energía normalizada como:

$$E_{norm}(W(t)) = \frac{E(W(t))}{E(f(t))} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2}{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \quad (4.7)$$

Dada la ortonormalidad de las componentes wavelet, el valor de $E_{norm}(W(t))$ estará comprendido entre (0, 1). No obstante, esta variable tiene el inconveniente de ponderar únicamente la energía y no la forma de onda de cada componente $D_i(t)$.

Finalmente, se define la variable

$$Eval(W(t)) = E_{norm}(W(t)) \cdot PMCC(f(t), W(t)) \quad (4.8)$$

cuyo objetivo será cuantificar el aporte de cada descomposición $D_i(t)$ y por tanto servirá para seleccionar aquellas las componentes j con la información relevante de la señal (4.4).

Es importante reseñar que tanto el $PMCC$, como la E_{norm} y el $Eval$ para la descomposición wavelet discreta se cumple que:

$$PMCC(f(t), f(t)) = PMCC\left(A_n(t) + \sum_{i=1}^n D_i(t)\right) = 1 \quad (4.9)$$

$$E_{norm}(f(t)) = E_{norm}\left(A_n(t) + \sum_{i=1}^n D_i(t)\right) = 1 \quad (4.10)$$

$$Eval(f(t)) = Eval\left(A_n(t) + \sum_{i=1}^n D_i(t)\right) = 1 \quad (4.11)$$

pero, por lo general, dadas dos descomposiciones l y m , se tiene que:

$$PMCC(f(t), D_l(t) + D_m(t)) \neq PMCC(f(t), D_l(t)) + PMCC(f(t), D_m(t)) \quad (4.12)$$

$$E_{norm}(D_l(t) + D_m(t)) \neq E_{norm}(D_l(t)) + E_{norm}(D_m(t)) \quad (4.13)$$

$$Eval(D_l(t) + D_m(t)) \neq Eval(D_l(t)) + Eval(D_m(t)) \quad (4.14)$$

debido a que las descomposiciones, al sumarse, interfieren entre sí a pesar de ser ortonormales.

Una vez definida la técnica, se estudian los parámetros de la DWT de una señal acústica emitida por una DP interna cuyas características son: ¹frecuencia de muestreo de la señal $F_s = 100$ MSps, ²la frecuencia central de la señal es de $F_c = 150$ kHz y su duración $32,5 \mu\text{s}$. Para analizar el filtro wavelet se ha escogido como wavelet madre Daubechies20 con un orden de descomposición $n = 20$

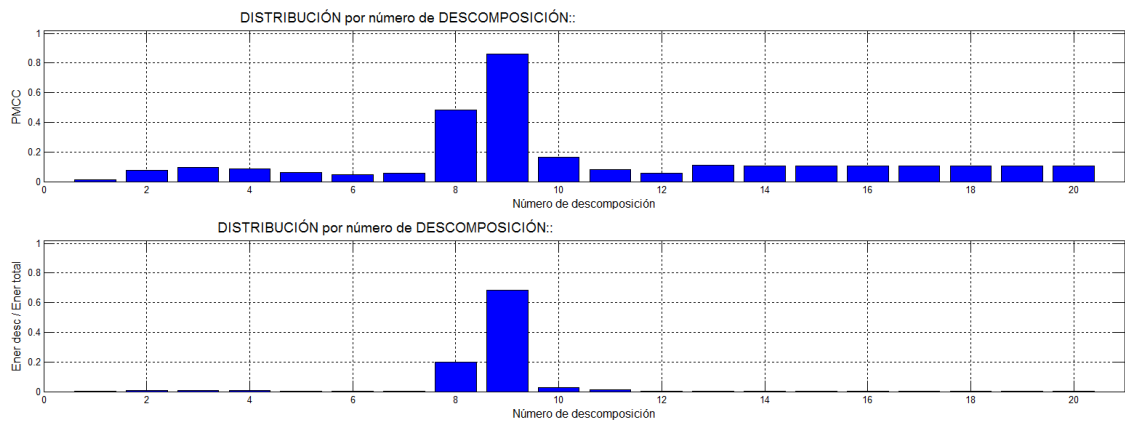


Figura 37. Distribución del PMCC (a) y de la E_{norm} (b) para cada una de las componentes wavelet $D_i(t)$ de una señal acústica.

A continuación, en la Fig. 38 se presenta la señal acústica (filtrada y sin filtrar), y cada una de las componentes $D_j(t)$ utilizadas en su reconstrucción, así como el espectro resultante, tras el filtrado wavelet (Fig. 39).

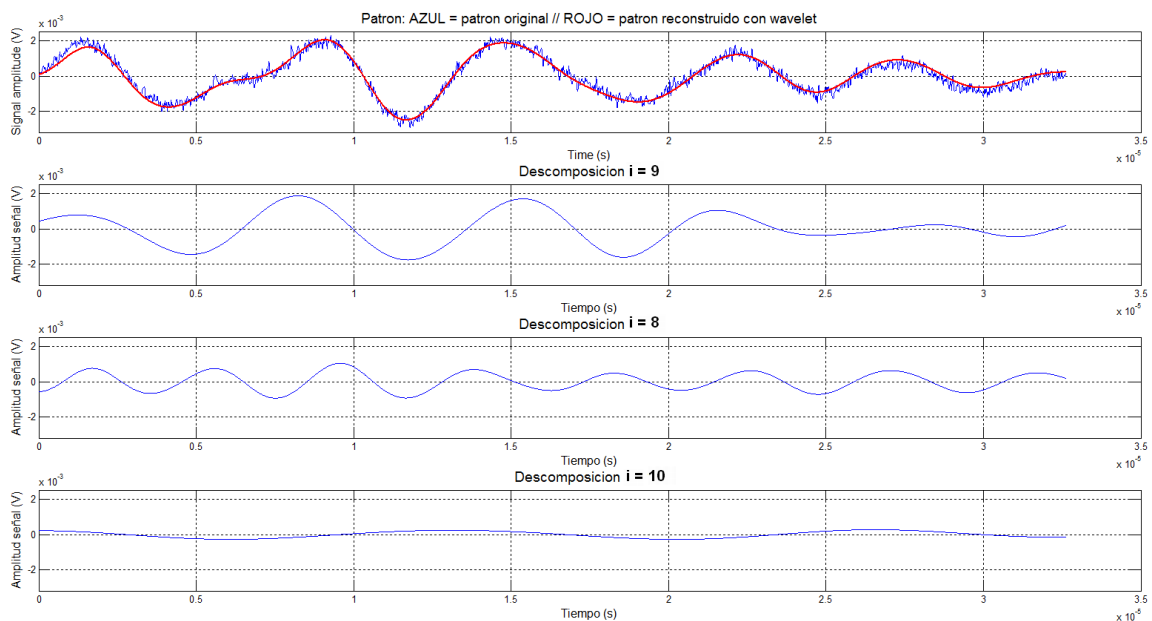


Figura 38. Reconstrucción wavelet (rojo) y señal original (azul) de una DP acústica utilizando las descomposiciones con mayor Eval.

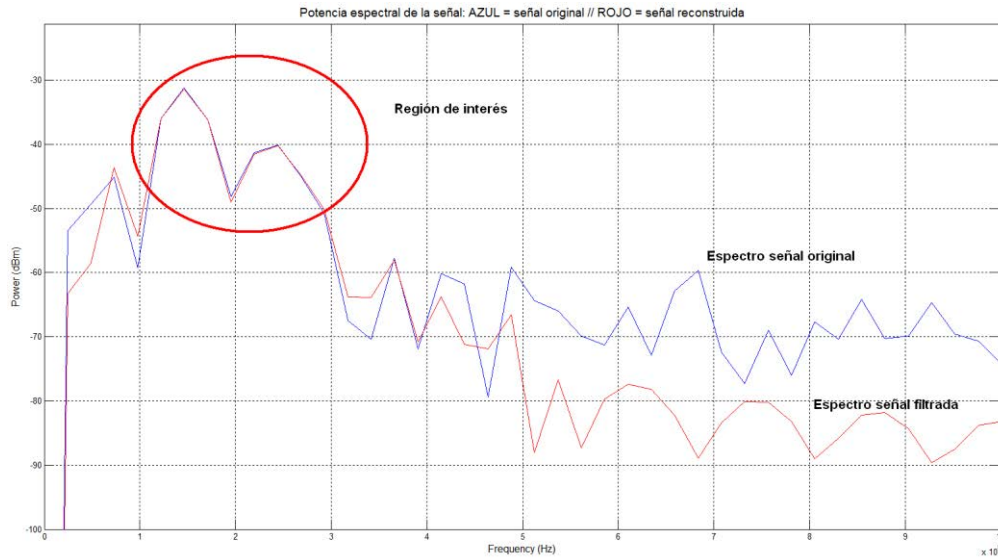


Figura 39. Espectro de la reconstrucción wavelet (rojo) y señal original (azul) de una DP acústica utilizando las descomposiciones con mayor Eval.

Como se puede apreciar, las componentes D_9 , D_8 y D_{10} contienen prácticamente toda la información de la señal, mientras que el aporte del resto de componentes es o insignificante o ruido; por tanto, debe fijarse un criterio umbral o límite de selección de componentes $D_j(t)$ que asegure la calidad del filtrado.

Para estudiar cómo se comporta el filtro con una señal de espectro ancho, se utiliza la señal patrón de una medida eléctrica de una DP interna, cuyas características son: ¹frecuencia de muestreo de la señal $F_s = 100$ MSps, ²la frecuencia central de la señal es $F_c = 6,4$ MHz y ³su duración 750 ns.

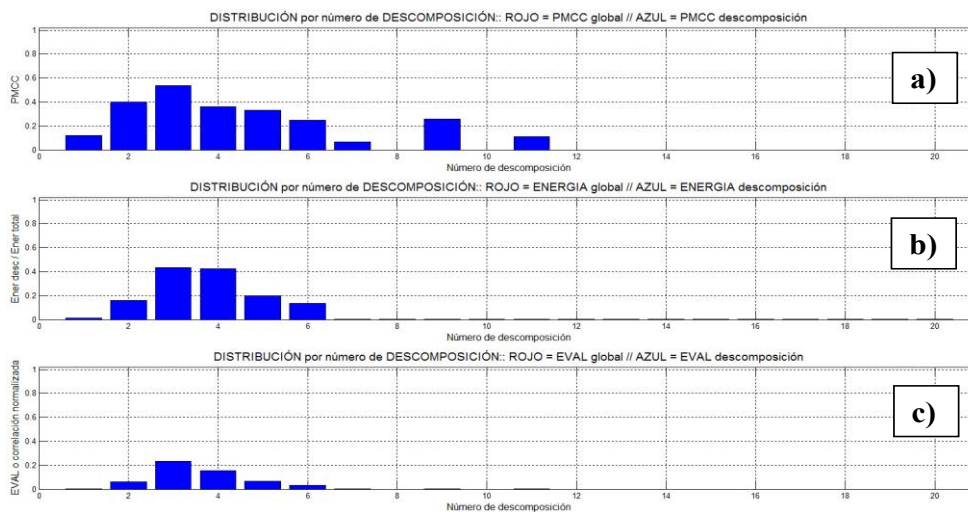


Figura 40. Distribución del PMCC (a), de E_{norm} (b) y Eval (c) para cada una de las componentes wavelet $D_i(t)$.

Si escogemos las $D_i(t)$ con el valor más alto, obtenemos los resultados de la Tabla 3

Descomposición D_j	D_3	D_2	D_4	D_5	D_9
$PMCC(D_j)$	0,536	0,399	0,360	0,333	0,259
$PMCC(\sum D_j)$	0,536	0,673	0,847	0,924	0,924
Incremento $PMCC(\sum D_j)$	0,536	0,136	0,174	0,077	0,000
$E_{norm}(D_j)$	0,433	0,160	0,425	0,197	0,000
$E_{norm}(\sum D_j)$	0,433	0,579	0,778	0,939	0,939
Incremento $E_{norm}(\sum D_j)$	0,433	0,147	0,199	0,161	0,000
$Eval(D_j)$	0,232	0,064	0,153	0,066	0,000
$Eval(\sum D_j)$	0,232	0,390	0,659	0,867	0,868
Incremento $Eval(\sum D_j)$	0,232	0,158	0,269	0,208	0,000

Tabla 3. Relación de los parámetros bajo estudio, utilizando la ordenación de los D_j por el parámetro del PMCC

En la tabla se muestran los valores utilizados en la figura anterior. Se han resaltado las casillas en color verde (si el valor aumenta respecto del anterior) y en color rojo (si el valor disminuye). Como se puede apreciar, el criterio de ordenación de mayor a menor $PMCC(D_j)$ no es el más adecuado, ya que: ¹introduce como componente con información a la descomposición $D_9(t)$ cuyo peso en la señal es prácticamente cero y ²prioriza la componente D_2 frente a las componentes D_4 y D_5 , cuando el aporte de D_2 en el incremento del $PMCC(\sum D_j)$ es menor que el resto de componentes. Si reconstruimos la señal con estos valores se obtienen la señal temporal de la Fig. 41 y su espectro correspondiente en la Fig. 42.

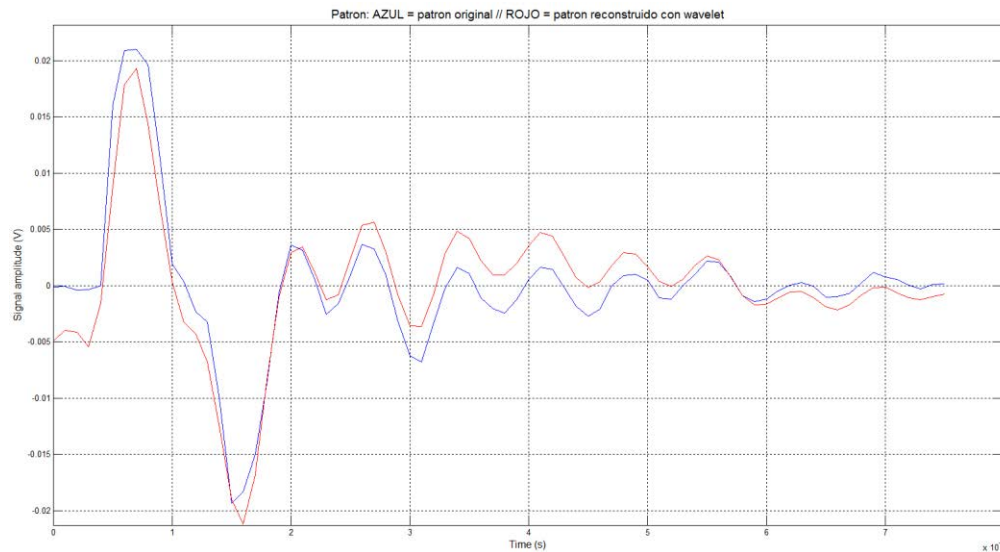


Figura 41. Reconstrucción wavelet de la señal original utilizando las cinco descomposiciones con mayor PMCC: (rojo) señal original (azul) reconstrucción.

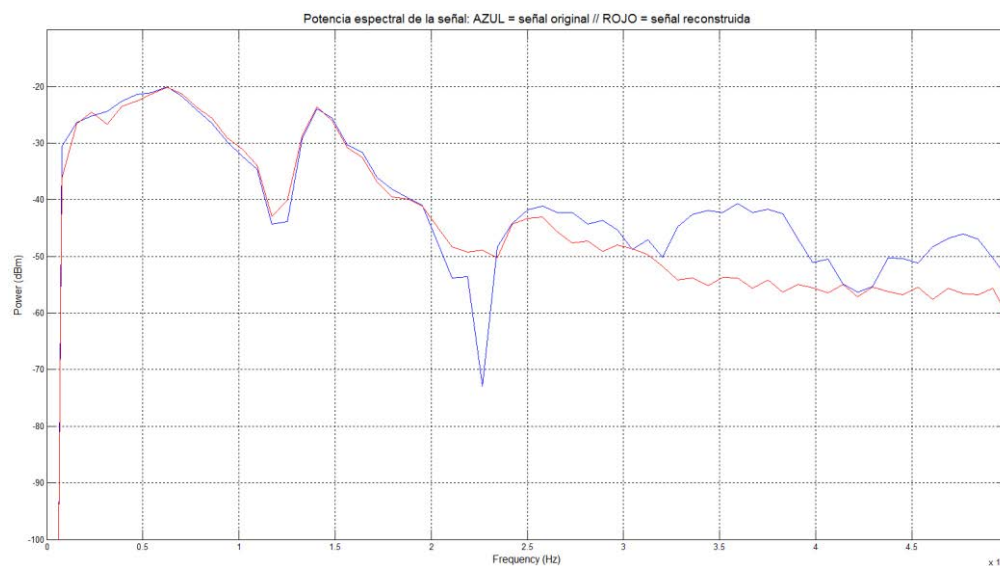


Figura 42. Espectro de la reconstrucción wavelet (rojo) de la señal original (azul) utilizando las cinco descomposiciones con mayor PMCC.

En este caso, al ser el sensor eléctrico de banda ancha, las componentes espectrales están menos acotadas y se requieren más componentes wavelet para la reconstrucción de la señal. Además, al estar la frecuencia central de la señal eléctrica en 6,4 MHz frente a la frecuencia central de la señal acústica que están en 150 kHz, la componente wavelet principal de la señal eléctrica es D_3 , frente a la componente D_9 de las señales acústicas.

Se puede observar que la reconstrucción no es del todo precisa ya que, tal y como se recoge en la Tabla 4, se ha escogido la componente D_9 frente a la componente D_6 . Por lo tanto, el criterio de selección de términos $D_j(t)$ por valor del PMCC no es el más adecuado. Se aplica entonces el criterio de selección por valor del parámetro $Eval(D_j)$.

Descomposición D_j	D_3	D_4	D_5	D_2	D_6
$PMCC(D_j)$	0,536	0,360	0,333	0,399	0,249
$PMCC(\sum D_j)$	0,536	0,742	0,831	0,924	0,993
Incremento $PMCC(\sum D_j)$	0,536	0,206	0,089	0,093	0,069
$E_{norm}(D_j)$	0,433	0,425	0,197	0,160	0,133
$E_{norm}(\sum D_j)$	0,433	0,627	0,784	0,939	0,986
Incremento $E_{norm}(\sum D_j)$	0,433	0,194	0,157	0,155	0,047
$Eval(D_j)$	0,232	0,153	0,066	0,064	0,033
$Eval(\sum D_j)$	0,232	0,465	0,652	0,867	0,979
Incremento $Eval(\sum D_j)$	0,232	0,233	0,186	0,216	0,112

Tabla 4. Relación de los parámetros bajo estudio utilizando la ordenación de los D_n por el parámetro del $Eval$

En la Tabla 4 el criterio de ordenación de mayor a menor se realiza sobre el valor del parámetro $Eval(D_j)$. En este caso se obtiene la reconstrucción de la señal con la traza temporal mostrada en la Fig. 43 y cuyo espectro es el representado en la Fig. 44.

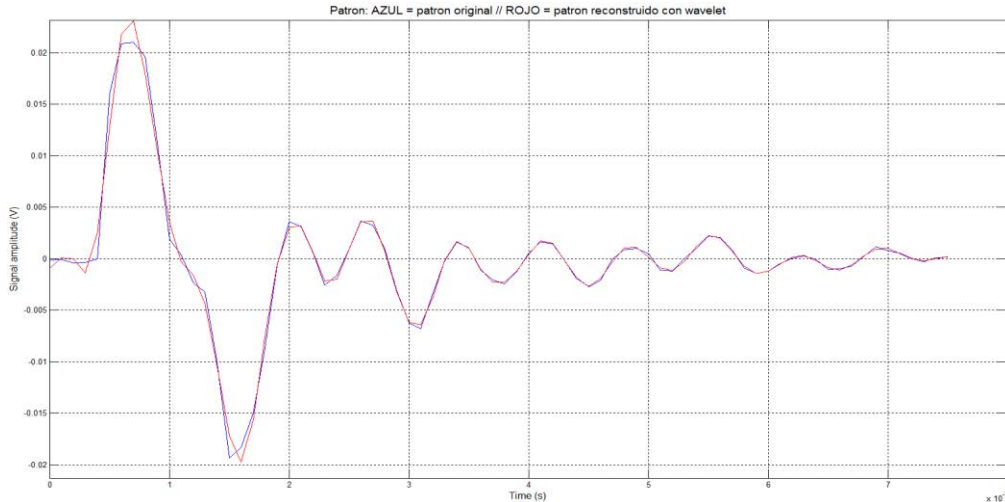


Figura 43. Reconstrucción wavelet (rojo) de la señal original (azul) utilizando las cinco descomposiciones con mayor Eval.

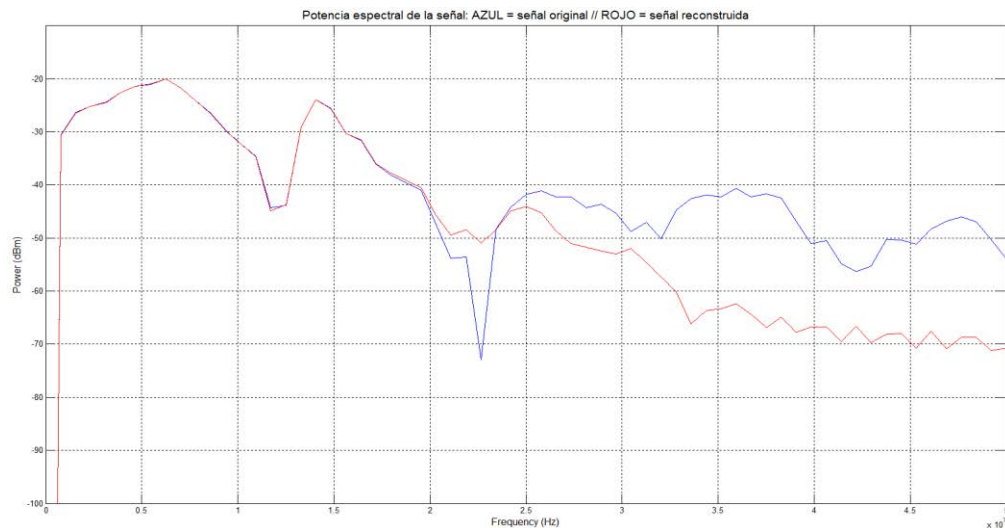


Figura 44. Espectro de la reconstrucción wavelet (rojo) de la señal original (azul) utilizando las cinco descomposiciones con mayor Eval.

En este caso, la reconstrucción de la señal es mucho más precisa respecto a la ordenación obtenida a través del valor del $PMCC(D_j)$; es discutible si la ordenación de los parámetros D_2 y D_5 es la más adecuada ya que parece que no quedan ordenados por su aportación final al incremento del $PMCC(\sum D_j)$ aunque sus valores son prácticamente idénticos.

Como ya se ha visto en el filtro wavelet universal, cuando se desconoce cuánta información útil y cuánto ruido posee una serie temporal es difícil fijar un umbral o un criterio de selección de componentes.

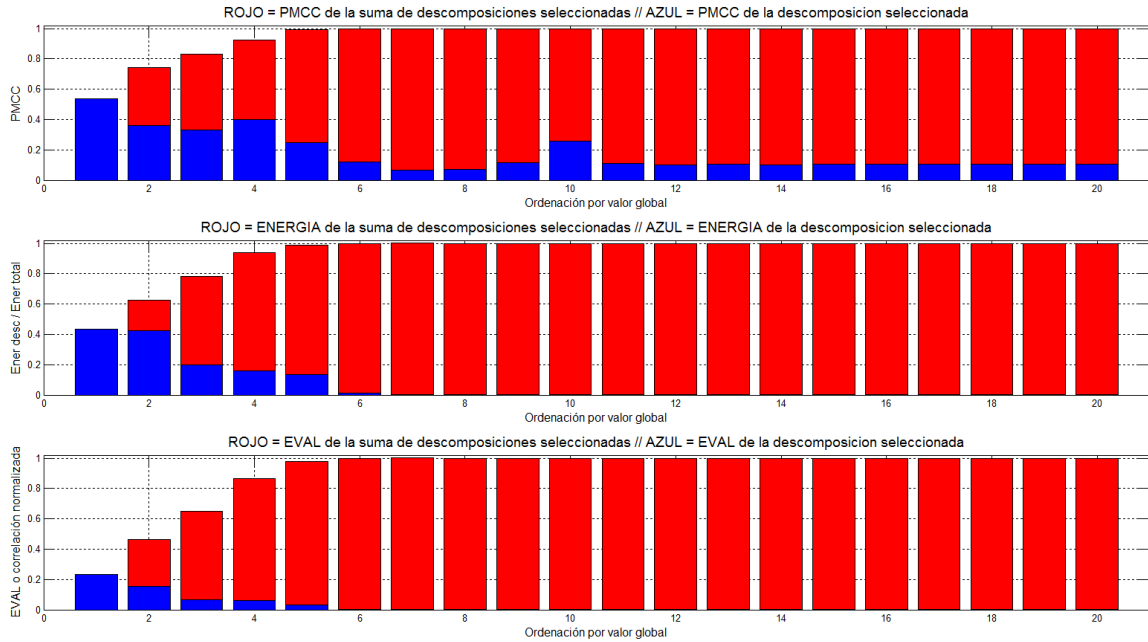


Figura 45. Comparación del valor individual (azul) y acumulado (rojo) cuando los términos $D_j(t)$ se ordenan en función del parámetro Eval (c) para: PMCC (a), E_{norm} (b) y Eval (c).

Si nos fijamos en la evolución de los distintos parámetros de la IDWT de forma gráfica (Fig. 45), obtenemos que a partir del quinto término $D_j(t)$ añadido, el valor del PMCC de la reconstrucción IDWT es superior al 95% y la información aportada o es insignificante o ruido.

En el caso del filtro wavelet propuesto, la señal es conocida y el patrón se encuentra debidamente acondicionado, por lo que el criterio umbral para seleccionar componentes j , una vez ordenadas por su valor $Eval(D_i)$ es:

$$PMCC\left(\sum D_j, f(t)\right) > 0'95 \quad (4.15)$$

Por lo tanto, se añaden componentes D_j hasta que el parecido entre la forma de onda de señal original y la reconstruida sea mayor a un 95%.

Una vez definido el filtro wavelet específico se construye el algoritmo para su programación en Matlab[®]:

Para el primer paso de análisis de cada señal patrón se presenta el algoritmo utilizado; donde la *señal patrón* se descompone y se reconstruye para convertirse en una nueva señal llamada *patronw* de la misma duración y con una forma de onda característica que será de utilidad para detectar otras señales DP. Adicionalmente, el algoritmo almacena la configuración de descomposición y reconstrucción de la señal patrón para utilizarla en el acondicionamiento del resto de series temporales del canal:

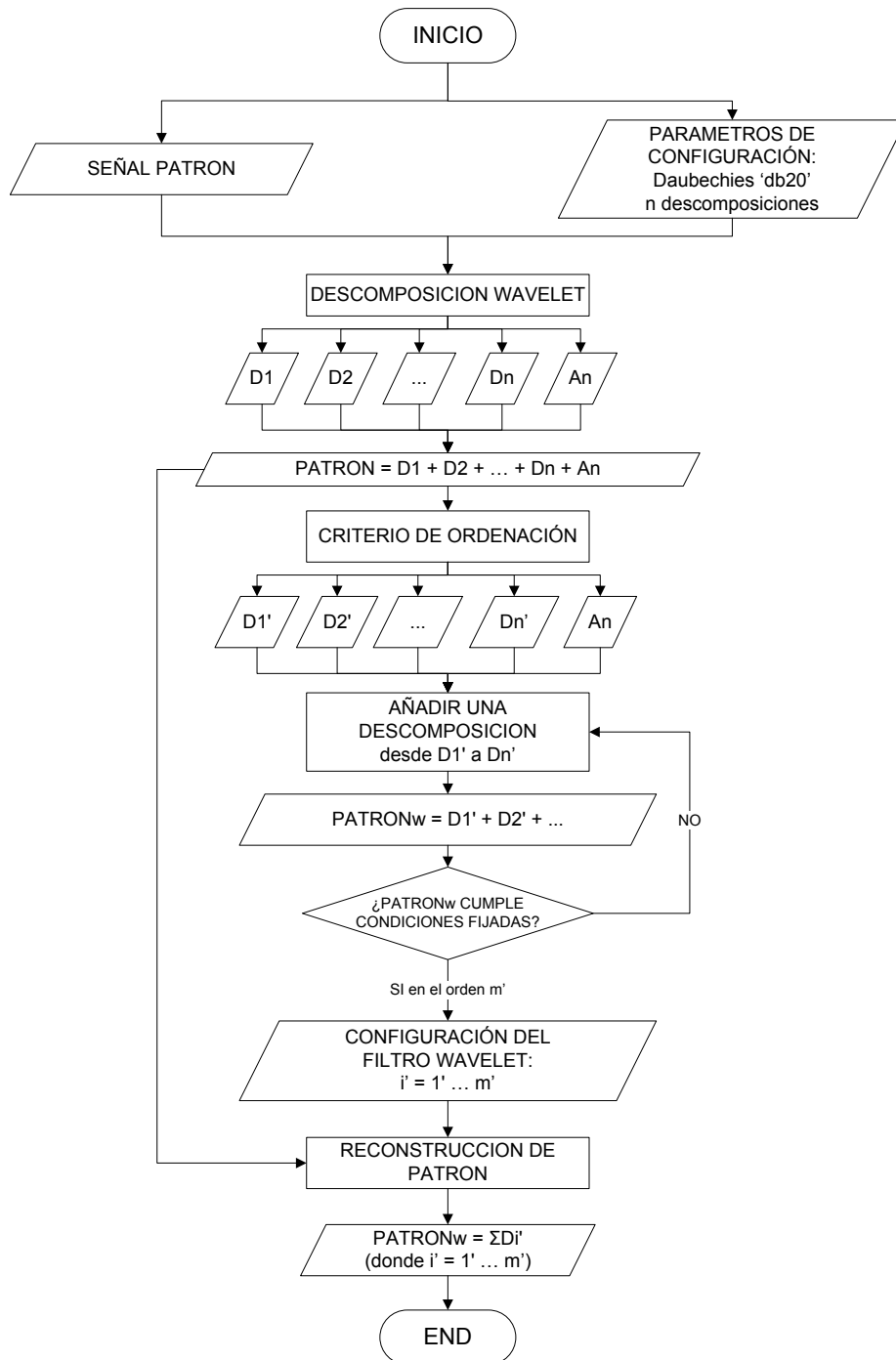


Figura 46. Algoritmo de configuración del filtro wavelet específico a partir del patrón.

Una vez obtenidos los parámetros de configuración del filtro wavelet para la señal patrón, se aplica dicha configuración para el filtrado y acondicionamiento de las series temporales adquiridas por dicho canal mediante el siguiente algoritmo:

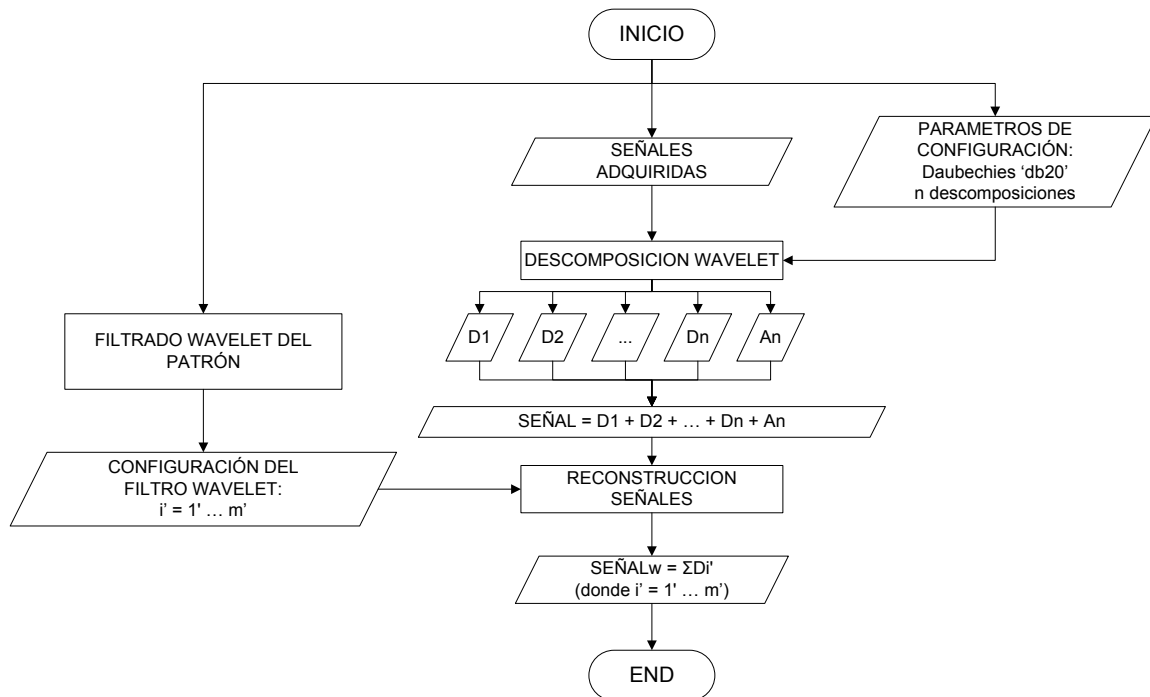


Figura 47. Algoritmo de filtrado de señales a partir de configuración previa.

En el apartado de análisis de señales experimentales se abordarán los resultados obtenidos y cómo se ajustan a las necesidades del problema.

4.2.3 Modelado de señales provenientes de descargas parciales

Una vez diseñado el filtro wavelet se pueden modelar las señales generadas por las DP y caracterizarlas. Para ello se configura el sistema experimental cerca del PDIV tanto para la generación de DP internas como superficiales y se escogen aquellas de gran amplitud y solitarias.

Para las descargas internas se ha seleccionado la siguiente señal (Fig. 48):

CAPÍTULO 4: Análisis y modelado de las emisiones generadas por una descarga parcial

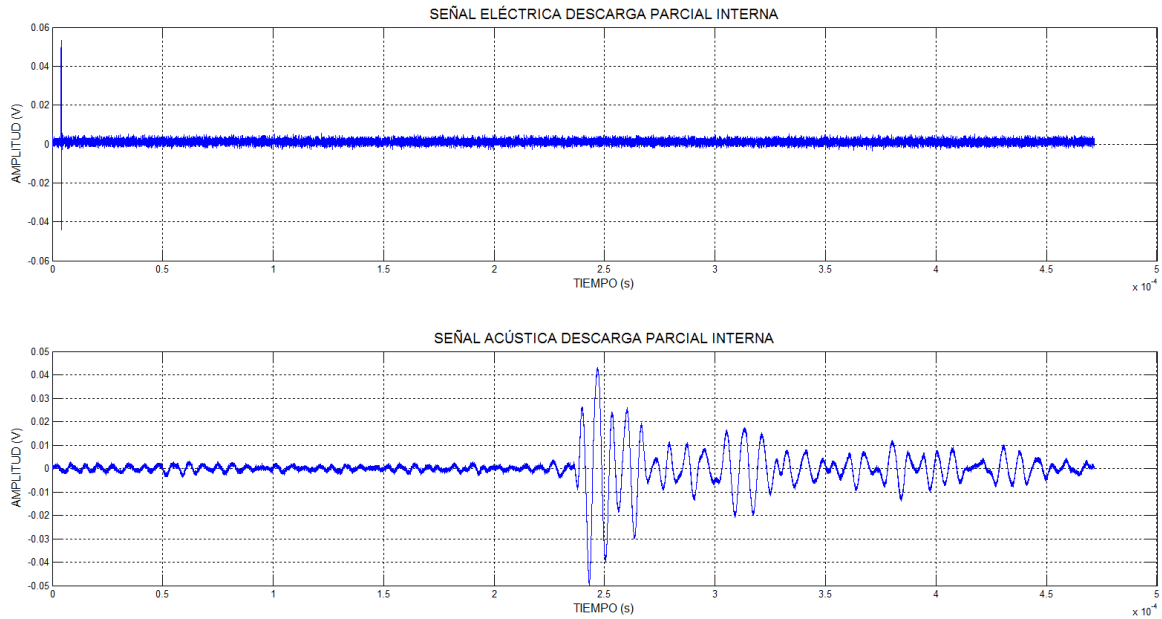


Figura 48. Evento DP interna eléctrica (superior) y acústica (inferior)

Para las descargas superficiales la señal escogida es la siguiente (Fig. 49):

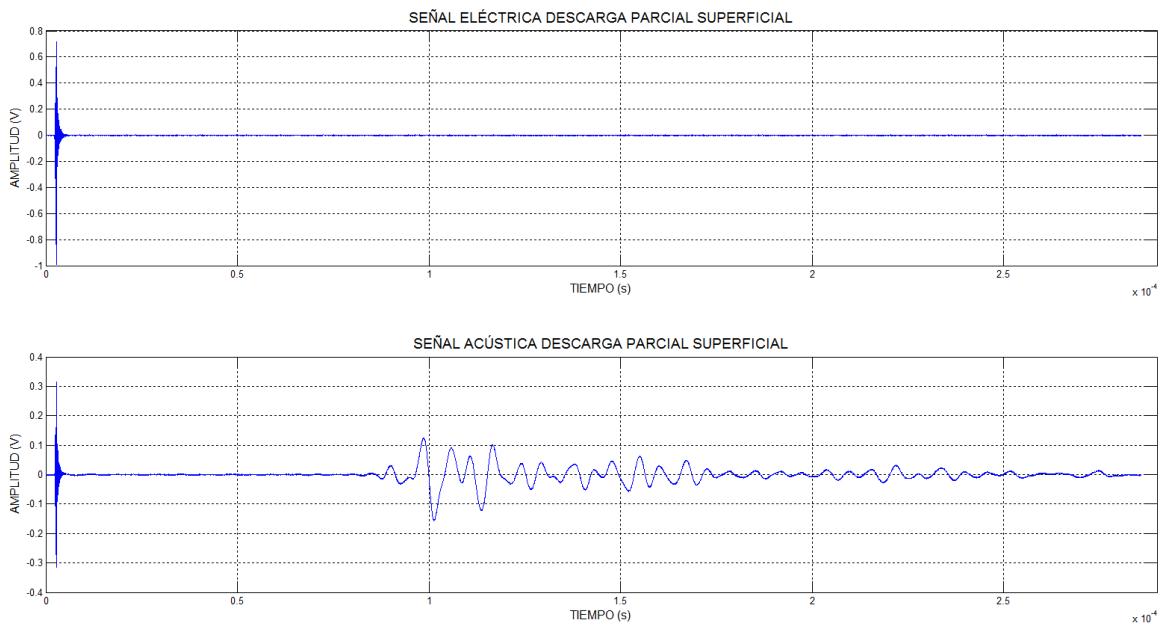


Figura 49. Evento DP superficial eléctrica (superior) y acústica (inferior)

Utilizando el filtro wavelet específico, podemos caracterizar las componentes wavelet de las señales eléctricas.

Las componentes wavelet de la señal eléctrica para la DP interna son las mostradas en la Fig. 50.

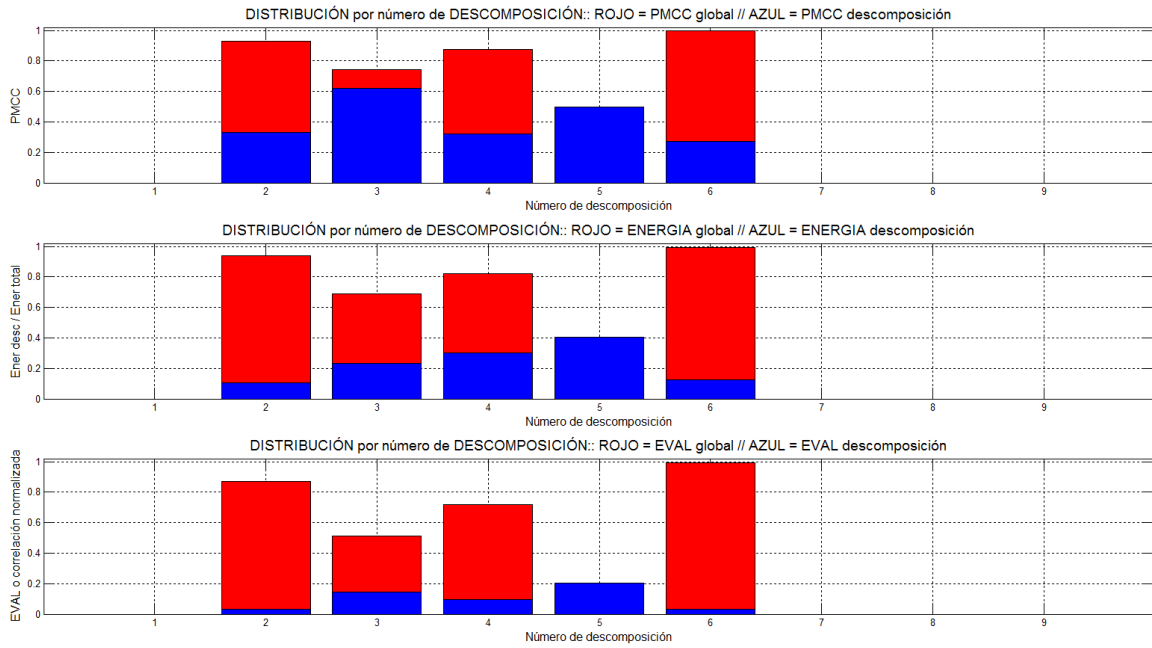


Figura 50. Componentes wavelet para la señal eléctrica de una DP interna

Las componentes wavelet de la señal eléctrica para la DP superficial son mostradas en la Fig. 51.

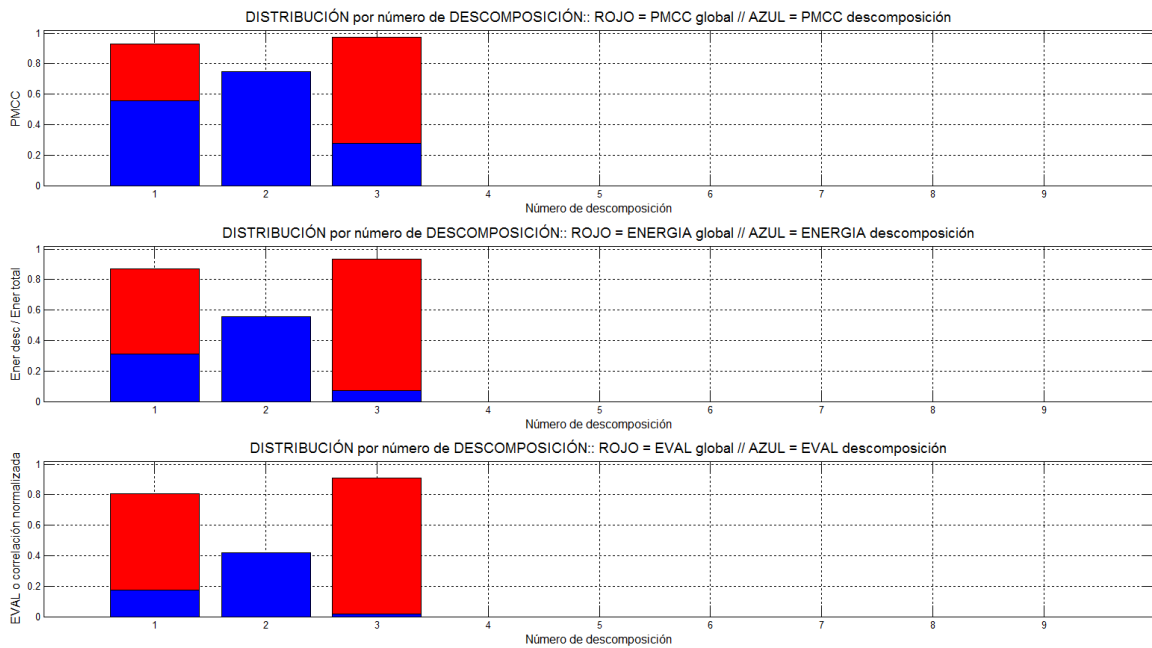


Figura 51. Componentes wavelet para la señal eléctrica de una DP superficial

Comparando las componentes eléctricas de la DP interna y superficial, encontramos diferencias notables que son de ayuda para poder identificarlas. Por un lado, la frecuencia central de las DP internas es menor que la de las DP superficiales ya que la componente de mayor energía para las DP internas es la D_5 frente a la componente D_2 de las DP superficiales. Adicionalmente, las DP internas están constituidas por 5 componentes (de la 2 a la 6) frente a las 3 componentes que utilizan las DP superficiales (de la 1 a la 3).

Esta información puede ser utilizada para distinguir las señales eléctricas provenientes de DP internas y superficiales.

En cuanto a las señales acústicas, encontramos que las componentes para las DP internas son las mostradas en la Fig. 52.

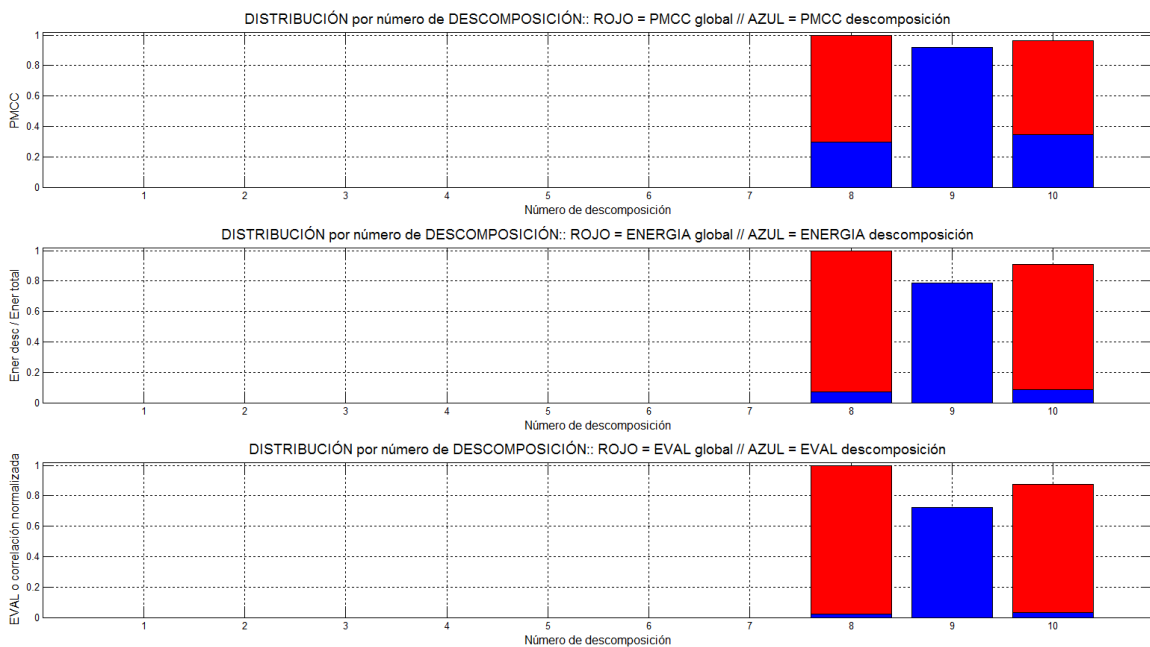


Figura 52. Componentes wavelet para la señal acústica de una DP interna

Las componentes wavelet de la señal acústica para la DP superficial son las mostradas en la Fig. 53.

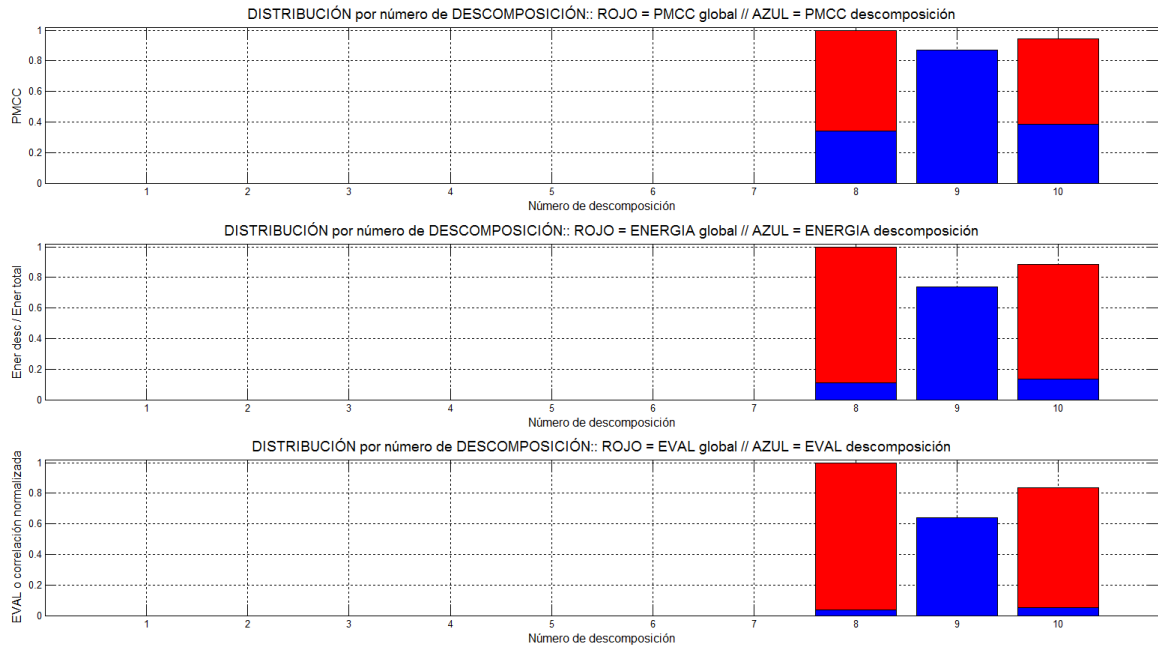


Figura 53. Componentes wavelet para la señal eléctrica de una DP Superficiales

Analizando las componentes de ambas DP observamos que la respuesta acústica del sistema es prácticamente idéntica a pesar de que su amplitud es distinta (200 mV superficiales frente a 10 mV internas). La mayor cantidad de energía se concentra en la componente D_9 ; esto se debe a que el sensor es de banda estrecha y además la frecuencia central se encuentra en torno a 150 kHz.

De esta forma quedan caracterizadas y filtradas las señales generadas por las DP del experimento. A continuación, se muestran las técnicas de detección de tiempos que se emplearán para estudiar el retardo entre la señal eléctrica y la acústica.

4.3 Técnicas de detección de la señal

4.3.1 Correlación cruzada

En procesamiento de señales, la correlación cruzada es una medida de la similitud entre dos señales. Se suele usar en reconocimiento de patrones ya que permite comparar una señal que es conocida (patrón) con una señal desconocida y así encontrar, en dicha señal, características relevantes de la señal patrón buscada.

La correlación cruzada es función del tiempo relativo entre las señales, también se la conoce como producto escalar desplazado, y es de utilidad para encontrar la diferencia de tiempos entre dos eventos similares.

Sean dos señales discretas $f(k)$ y $g(k)$ de longitud N , entonces la correlación cruzada se define como:

$$r_{fg}(l) = \sum_{k=-N}^{+N} f(k) \cdot g(k-l); \quad \text{donde } l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N \quad (4.16)$$

donde la duración de ambas señales se iguala a la duración de la mayor de ellas (t_{\max}) y como resultado obtendremos una serie temporal cuya duración será $t \in [-t_{\max}, +t_{\max}]$. La información de interés se encuentra localizada en los máximos de la correlación cruzada comprendidos entre $t \in [0, +t_{\max}]$, tal y como se puede ver en la Fig. 54.

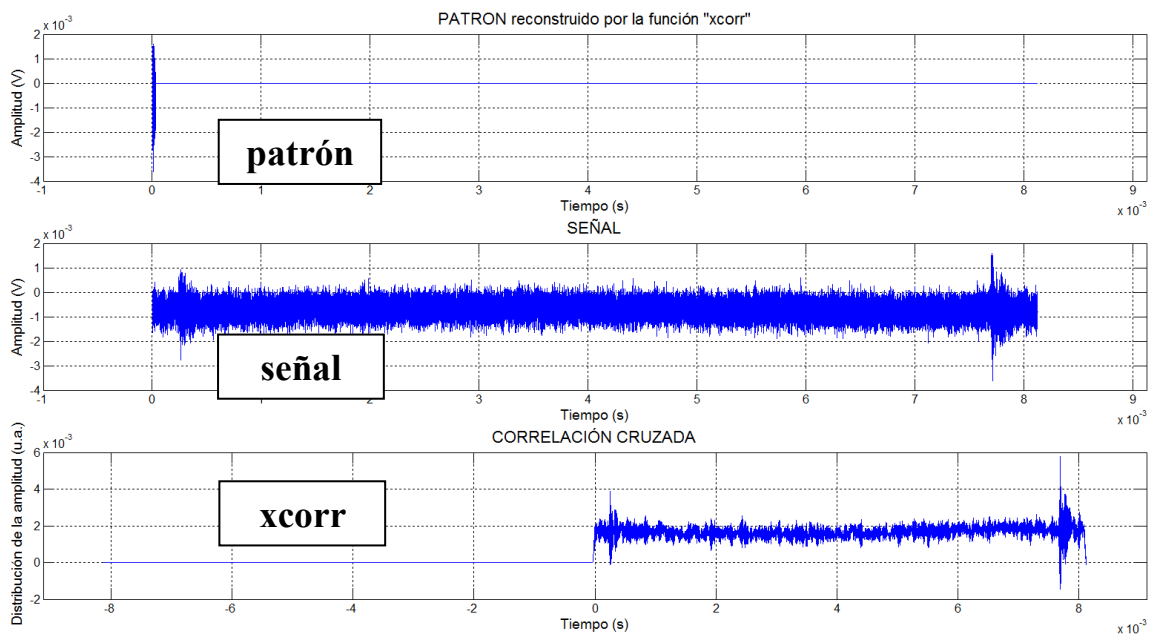


Figura 54. Ejemplo de la correlación cruzada (*xcorr*) entre una señal patrón DP seleccionada y una serie temporal en la que se quiere encontrar señales DP similares.

Cada máximo en la amplitud de la correlación cruzada tiene asociado un valor temporal t_0 , de la señal bajo análisis, donde se inicia una señal con la misma duración que la DP patrón y cuya similitud con el mismo se puede parametrizar calculando el PMCC (4.6) entre ambos.

4.3.2 Umbral de la envolvente

Esta técnica es la propuesta en el estándar del IEEE [16] para la detección de DP acústicas.

Para calcular el valor de inicio de la señal se pueden utilizar dos medidas: la primera consiste en calcular el instante donde la envolvente de la señal supera el nivel de ruido; y la segunda en calcular el instante donde la señal alcanza su valor máximo.

Al contrario de la correlación cruzada donde el tiempo de inicio se escoge en el inicio de la propia señal DP, con esta técnica se introduce un retardo en la detección, dependiendo del umbral escogido y del tiempo de subida de la propia señal.

4.3.3 Criterio de la energía de la señal

El criterio de la energía es una evolución de la detección por umbral de la amplitud de la envolvente de la señal. En este caso, se busca encontrar el instante donde la energía de la señal de una DP supera la energía del ruido en una adquisición temporal.

Para encontrar el instante donde la energía de la señal de la DP supera el ruido, se evalúa muestra a muestra la energía acumulada, menos un factor dependiente de la energía total de la adquisición. Cuando aparece una señal cuya energía supera la energía media de la adquisición, entonces se genera un mínimo que se utiliza como inicio de la señal [27].

Sea la señal temporal discreta $x_k(t)$; donde $k = 0, 1, 2, \dots, N$. Entonces podemos definir la curva de la energía acumulada S_i hasta el término i como:

$$S_i = \sum_{k=0}^i (x_k^2) \quad (4.17)$$

Con el objetivo de ponderar la aparición de una señal de DP cuya energía supere al valor medio del ruido; podemos definir la energía acumulada corregida S'_i de la siguiente manera:

$$S'_i = S_i - i\delta = \sum_{k=0}^i (x_k^2 - i\delta) = \sum_{k=0}^i \left(x_k^2 - i \frac{S_N}{\alpha \cdot N} \right) \quad (4.18)$$

donde el factor $i\delta$ añade una tendencia negativa en la energía acumulada y sirve para fijar el umbral de energía a partir de donde se detecta la DP, i es la muestra donde se

evalúa la energía acumulada y δ es un parámetro dependiente de la energía total de señal (S_N), de la longitud total de la misma (N) y de un parámetro corrector α cuyo valor es $\alpha \geq 1$ y que sirve para corregir el valor de la potencia media de la señal (S_N/N) cuando llega más de una señal a la vez. En nuestro caso consideraremos que las DP generadas son eventos temporalmente aislados, por lo que usaremos $\alpha=1$.

Mientras la señal $x_k(t)$ contenga ruido, el término S_i será menor que el producto $i\delta$. Cuando aparezca una señal DP con la suficiente energía en la componente temporal i , entonces el término x_i^2 será mayor que el término $i\delta$ y la energía acumulada corregida comenzará a crecer.

4.4 Caracterización del acondicionamiento y de la detección de señales de DP

Para caracterizar el procesamiento que se va a utilizar para medir las señales eléctricas y acústicas, se realiza una simulación de una señal con características similares a una adquisición real del experimento. Como las señales eléctricas de las DP y las acústicas de las DP superficiales tienen una SNR alta, se va a caracterizar la respuesta utilizando las señales acústicas de las DP internas.

4.4.1 Generación de una serie temporal simulada

Con el objetivo de simular una señal típica adquirida en el experimento, se construye una señal temporal de 20 ms de duración con una frecuencia de muestreo de 100 MSps. En esta señal temporal, se introduce de forma repetitiva la misma señal acústica modelo generada por una DP interna, con un retardo aleatorio entre 35 y 165 μ s para simular la naturaleza estocástica de las DP.

A la hora de introducir ruido en la señal se estudian las especificaciones del filtro digital aconsejado en el estándar del IEEE para la medida de DP [16]: ¹la banda de detección se debe ubicar entre 100 y 300 kHz, ²por debajo de 60 kHz la atenuación debe ser mayor de 48 dB y por encima de 500 kHz la atenuación debe ser mayor de 24 dB.

4.4 Caracterización del acondicionamiento y de la detección de señales de DP

Por este motivo, se añaden dos clases de ruido a la señal:

- I. Ruido monocromático en las bandas de 50 kHz (donde se ubica el ruido de Barkhausen creado por magneto-constricción del núcleo de un transformador), 60 kHz, 500 kHz (bandas límites del estándar del IEEE) y 600 kHz.
- II. Ruido blanco para simular la degradación de la SNR debida a la elevada atenuación que sufre la señal acústica dentro del transformador.

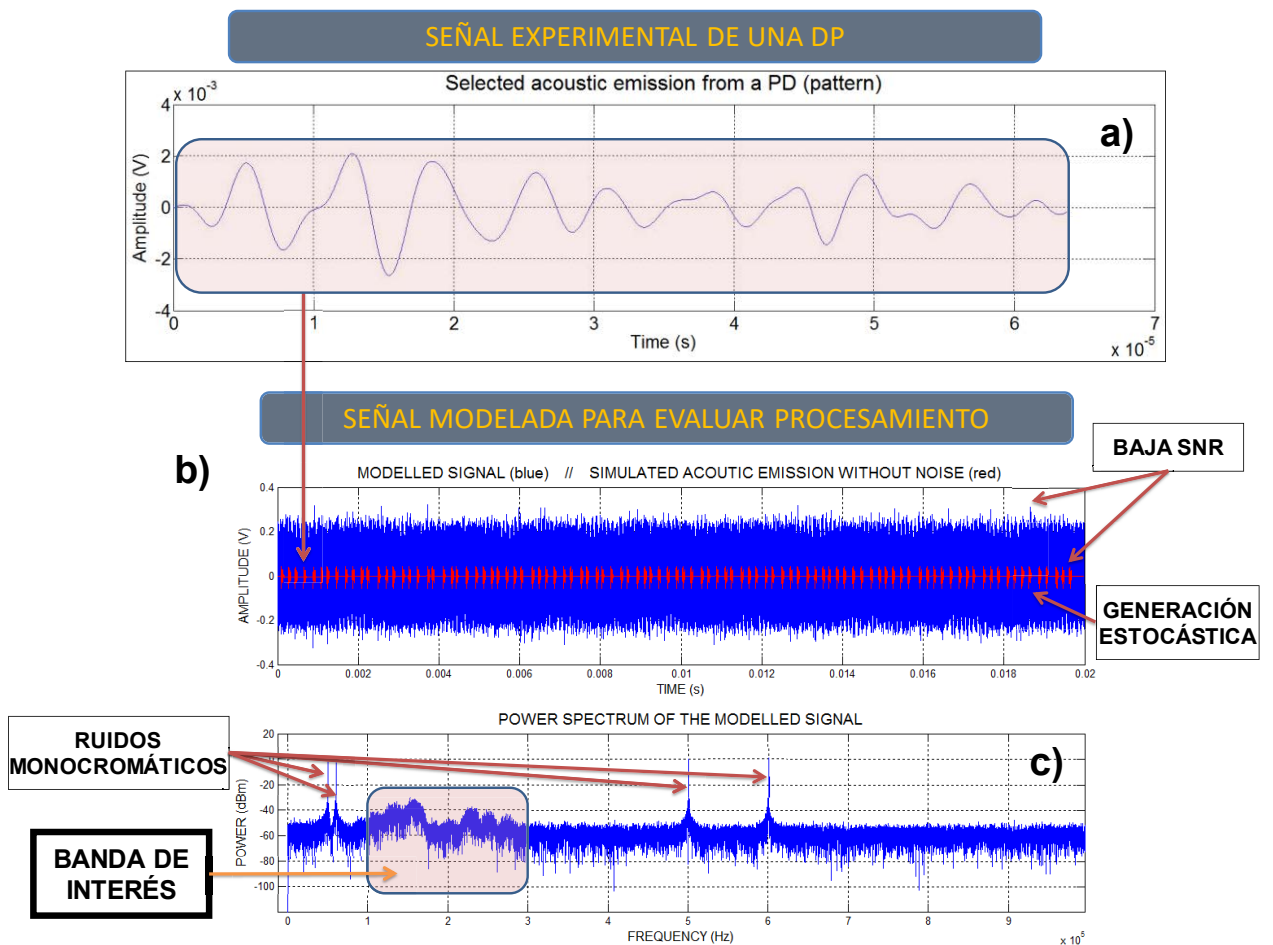


Figura 55. Señal acústica modelo DP interna (a); serie temporal modelada con ruido en azul y sin ruido en rojo (b) y el espectro asociado de la señal con ruido (c)

Finalmente, se obtiene una señal simulada (Fig. 55 (b) en azul) que tiene las siguientes características: ¹generación estocástica de descargas parciales, ²amplitud ajustable del ruido blanco gaussiano y ³amplitud ajustable de ruido monocromático en las regiones limítrofes de las especificaciones del IEEE.

Se define por tanto la variable R que será la encargada de ajustar la amplitud del ruido a añadir en la simulación:

$$R = \frac{\text{amplitud máxima ruido}}{\text{amplitud máxima patrón}} \quad (4.19)$$

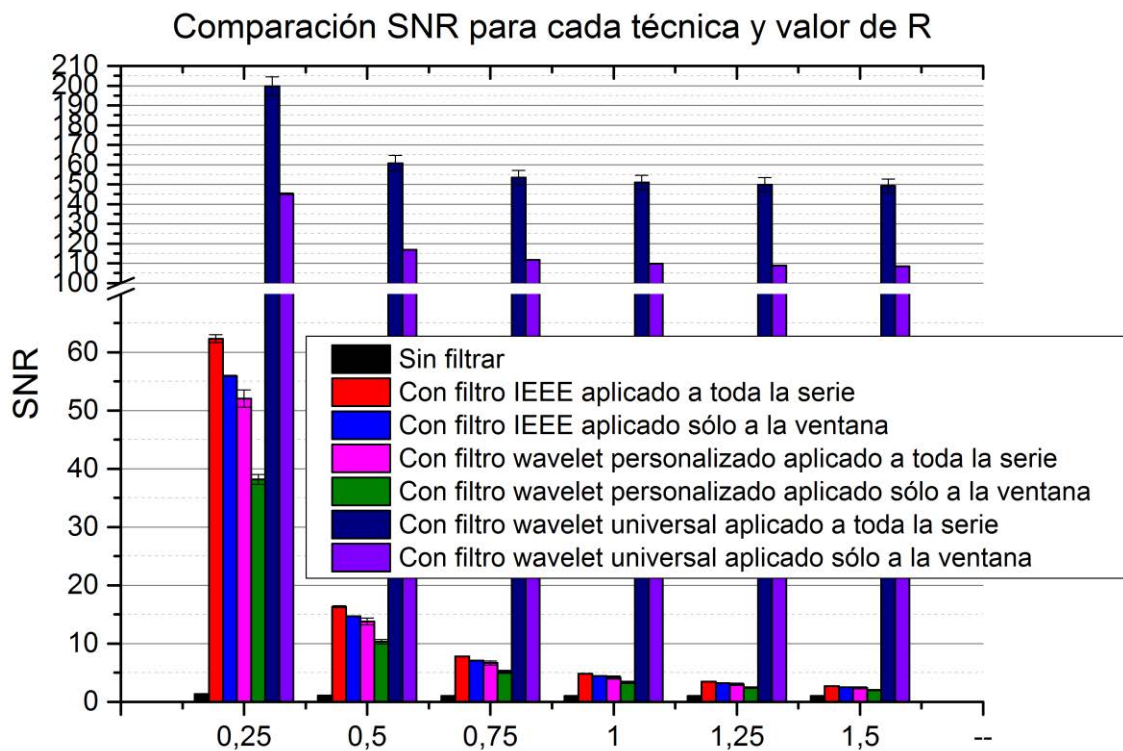
El valor de R se ajusta de forma independiente para el ruido monocromático y para el ruido blanco gaussiano.

4.4.2 Características de filtrado del filtro wavelet específico

Para comparar la relación señal a ruido se aplica la relación señal/ruido:

$$SNR = \frac{\text{Potencia señal}}{\text{Potencia ruido}} \quad (4.20)$$

En primer lugar, se compara los efectos del ruido monocromático en la SNR:



Valor de R (amplitud ruido / amplitud señal) de cada ruido monocromático

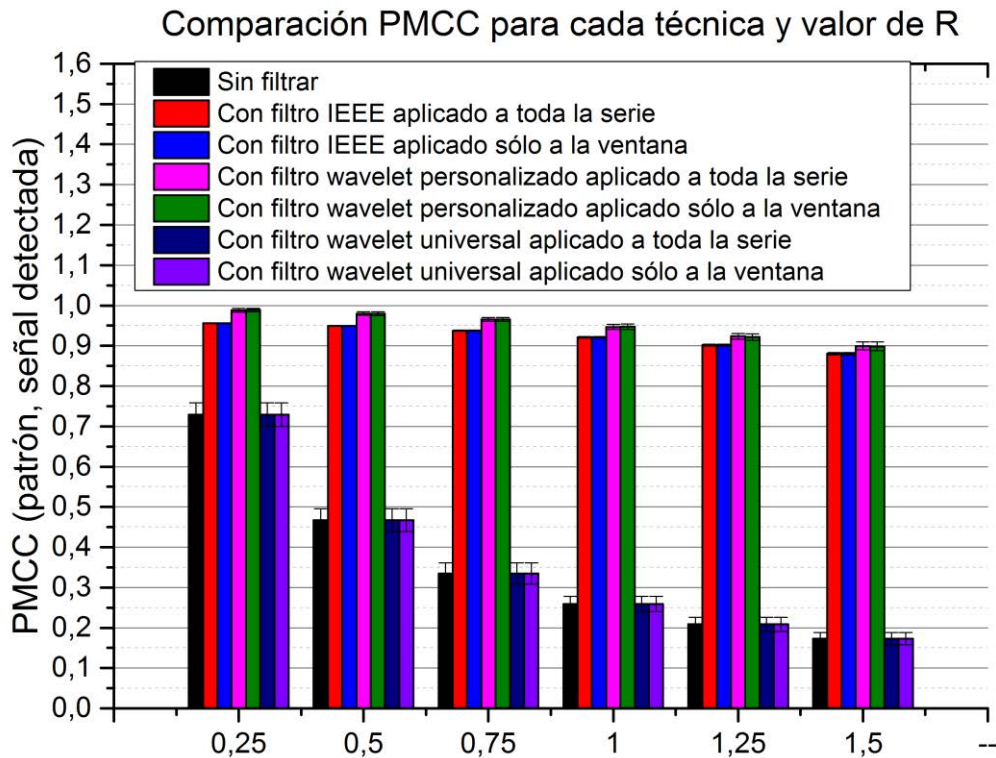
Figura 56. Comparación SNR de cada técnica de filtrado para el ruido monocromático.

En la figura se puede apreciar que la técnica que tiene mejor SNR es la del filtrado wavelet universal mientras que el resto de técnicas como el filtro IEEE o el filtro wavelet

4.4 Caracterización del acondicionamiento y de la detección de señales de DP

específico dan unos valores más bajos. También se puede apreciar que aplicar los filtros en la serie completa de 20 ms proporciona un valor mayor en la SNR que trocear la serie en ventanas más pequeñas de 200 μ s.

A continuación, se compara el valor del PMCC para estudiar la fidelidad de la forma de onda resultante de aplicar los filtros:



Valor de R (amplitud ruido / amplitud señal) de cada ruido monocromático

Figura 57. Comparación PMCC de cada técnica de filtrado para el ruido monocromático.

Al comparar el valor del PMCC observamos que tanto el filtro wavelet universal como la señal sin filtrar obtienen un valor similar del PMCC por debajo de 0,72, mientras que con el resto de técnicas permanece por encima de 0,86. En conclusión, el filtro wavelet universal está dejando pasar el ruido. El problema es que la señal DP tiene menos energía que el ruido, por lo que el filtro wavelet universal, al basar su criterio única y exclusivamente en la energía contenida en cada componente wavelet, se ha quedado con las componentes asociadas al ruido monocromático.

En la gráfica también se aprecia que, a pesar de tener menor SNR el filtro wavelet específico que el resto de filtros, es el que mejor conserva la forma de onda de la DP. Además, independientemente del filtro, se observa que el PMCC resultante es el mismo si

se filtra la señal de larga duración o si se filtra en ventanas más pequeñas, aunque la SNR sea menor al filtrar las ventanas.

Realizamos el mismo estudio para el filtrado de ruido blanco:

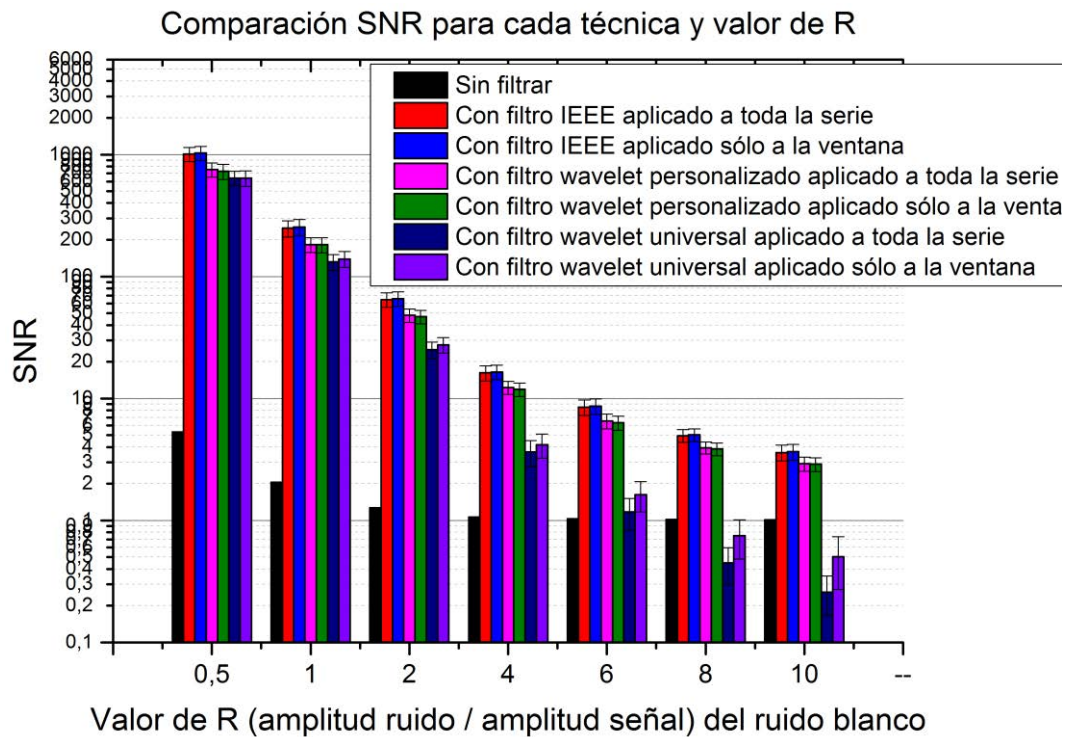


Figura 58. Comparación SNR de cada técnica de filtrado para el ruido blanco.

En esta figura se observa que el filtro IEEE es el que obtiene la mejor SNR frente a los filtros wavelet con el ruido blanco. En cuanto al filtro wavelet universal siguen apareciendo los mismos problemas de selección de componentes que con el ruido monocromática: cuando la energía del ruido es alta, entonces lo selecciona como señal y no lo filtra.

A continuación, se compara el valor del PMCC para estudiar la fiabilidad:

4.4 Caracterización del acondicionamiento y de la detección de señales de DP

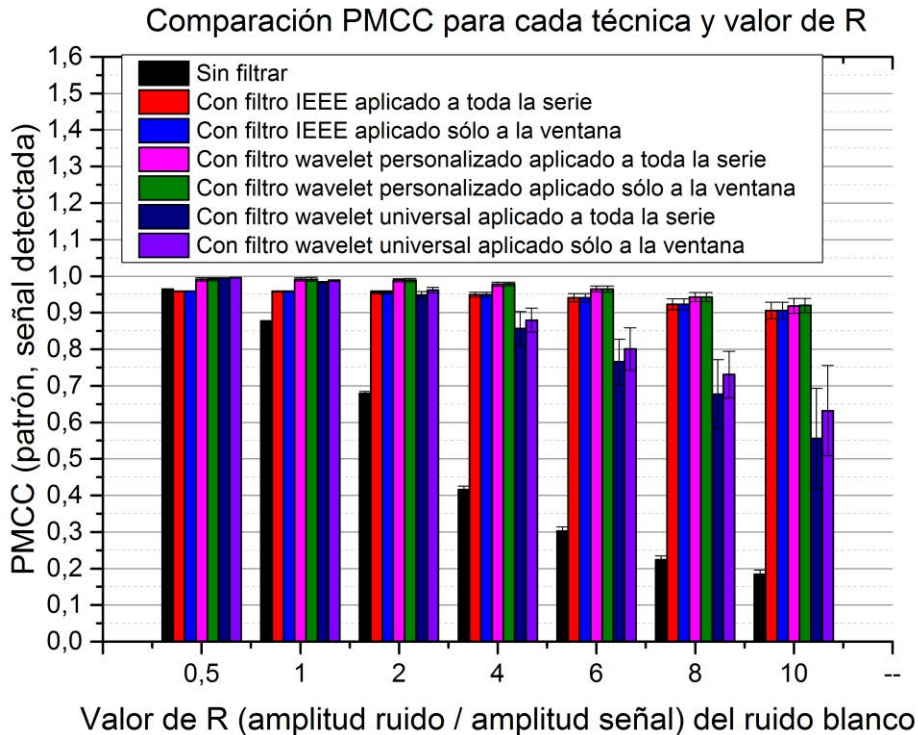


Figura 59. Comparación PMCC de cada técnica de filtrado para el ruido monocromático.

Si se compara el valor del PMCC, se puede observar que el filtro wavelet específico es el que mejor resultado da a la hora de preservar la forma de onda de la señal DP, mientras que, como observamos con la SNR, el filtro wavelet universal deja de ser eficiente a valores altos de la energía del ruido.

De estos datos extraemos que tanto el filtro digital propuesto por la guía del IEEE como el filtro wavelet específico son los que mejor se adaptan a las señales acústicas que se esperan detectar en la plataforma de ensayos. Sin embargo, el filtro wavelet específico sigue teniendo la ventaja de que puede adaptarse también a otros tipos de emisiones y además puede caracterizar y clasificar las señales a partir de sus componentes wavelet.

4.4.3 Detección del inicio de la señal

El objetivo de este apartado es estudiar qué combinación de filtro, más técnica de detección de tiempos, es la que mejor se ajusta al problema. Recordamos que las técnicas de detección de tiempos propuestas son: ¹detección de máximos de la envolvente, ²el valor mínimo de la energía acumulada de la señal y ³la correlación cruzada.

La simulación nos permite estimar la respuesta del procesamiento escogido, variando el ruido blanco con diferentes amplitudes. La variable de control escogida es Δt que es la diferencia entre el valor detectado por el algoritmo y el valor conocido de generación. Esto es:

$$\Delta t(s) = (t_{\text{detección_señal}} - t_{\text{generación_señal}}) \quad (4.21)$$

De esta manera, se evalúa la respuesta de las diferentes técnicas (Fig. 60).

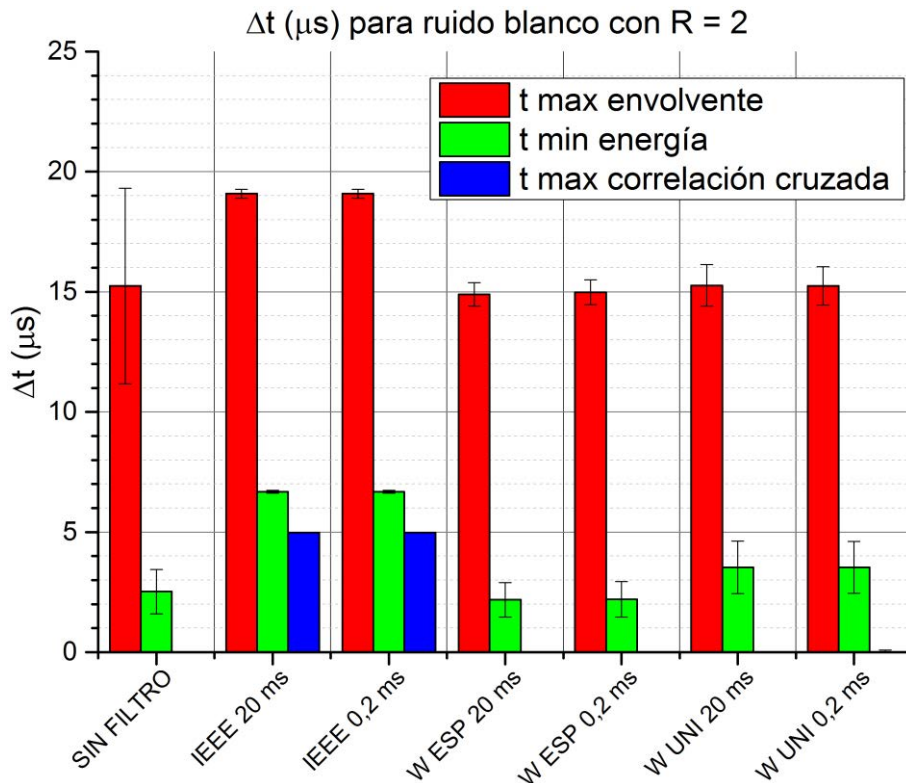


Figura 60. Promedio de detección de tiempos de inicio de la señal para relación de ruido blanco $R = 2$.

Para ruido blanco con una $R = 2$ observamos que todos los sistemas tienen una desviación por debajo de unos pocos microsegundos.

En cuanto a técnicas de filtrado observamos que el filtro del IEEE es el que aporta una mayor precisión en la medida aunque, por contra, introduce un desfase sistemático de unos $5 \mu s$ en la medida de tiempos. Por otro lado, los filtros wavelet no introducen ningún tipo de desfase (una de sus principales ventajas) pero son ligeramente menos precisos que el filtro IEEE (desviación por debajo de $2 \mu s$).

4.4 Caracterización del acondicionamiento y de la detección de señales de DP

En este caso en concreto, también se observa que no existe diferencia entre procesar series temporales de 20 ms o de 200 μ s. Aunque más adelante veremos que este dato sí puede influenciar en algunos de los filtros.

En cuanto a las técnicas de medida de tiempos, se aprecia que la medida del máximo es la que introduce mayor retraso frente a la medida de la energía mínima es mucho más exacta e introduce una desviación menor. Por último, la detección por correlación cruzada es la que muestra la mayor exactitud en la medida aplicándola a cualquier filtro; esto también se debe a que la señal simulada, a pesar del ruido, utiliza el mismo modelo de señal patrón buscado.

A continuación, mostramos la desviación de tiempos para un ruido blanco con relación de amplitud $R = 4$.

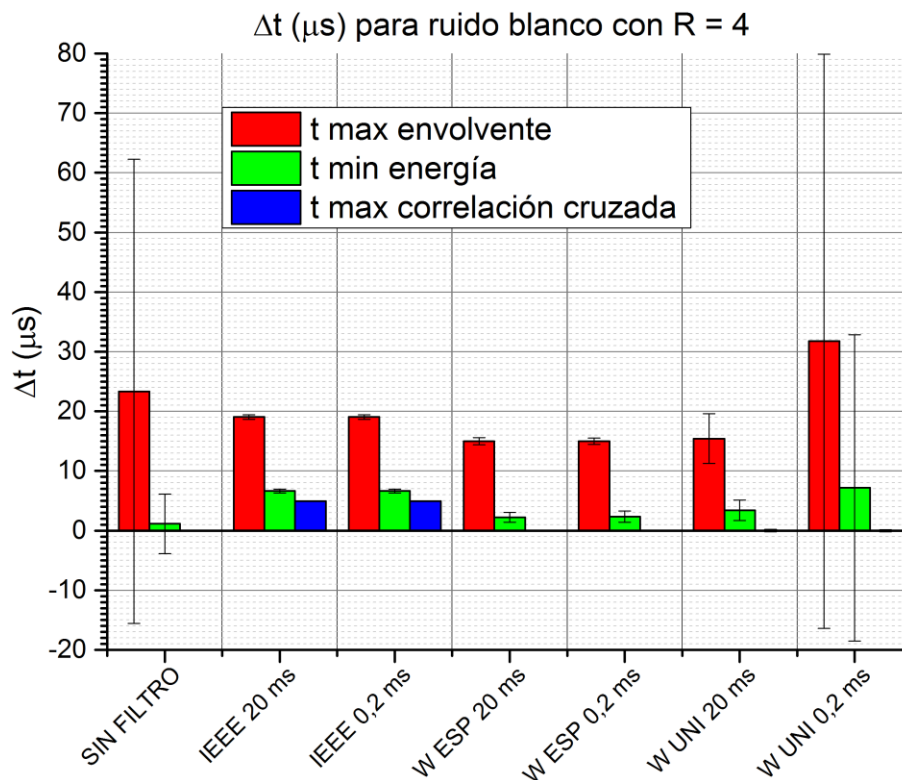


Figura 61. Promedio de detección de tiempos de inicio de la señal para relación de ruido blanco $R = 4$.

Para $R = 4$ encontramos que el filtro IEEE y el filtro wavelet específico mantienen sus características.

Sin embargo, el filtro wavelet universal empieza a perder su capacidad de escoger las componentes que contienen información de la señal y, por este motivo, aumenta la

CAPÍTULO 4: Análisis y modelado de las emisiones generadas por una descarga parcial

desviación de la medida. Este efecto, se agrava de manera particular cuando la ventana escogida es de menor tamaño 200 μ s frente a 20 ms a pesar de que la SNR es ligeramente superior en la ventana corta (Fig. 61).

Por último, y a modo orientativo, se presenta el tiempo empleado en cada uno de los procesamientos realizados (Tabla 5).

Tiempo global de procesamiento (ms)	Envolvente	Energía mínima	Correlación cruzada
Filtro IEEE en ventanas de 20 ms	188	201	431
Filtro IEEE en ventanas de 200 μ s	191	201	433
Filtro wav. específico en ventanas de 20 ms	192	201	433
Filtrada wav. específico en ventanas de 200 μ s	197	200	434
Filtrada wav. universal en ventanas de 20 ms	190	202	431
Filtrada wav. universal en ventanas de 200 μ s	192	201	434

Tabla 5. Valor orientativo del tiempo de procesamiento de la combinación de las técnicas usadas

La Tabla 5 es orientativa, ya que los tiempos dependen del equipo usado y otros factores relacionados con la programación. No obstante, se puede ver que los tiempos de filtrado van muy a la par. En cuanto a las técnicas de detección de tiempos, la técnica de cálculo de la energía mínima supone un incremento del 7% aproximadamente respecto al cálculo del máximo de la envolvente; mientras que la correlación cruzada es la más pesada con un incremento del 129%.

4.5 Conclusiones

En el presente capítulo se ha presentado un conjunto de técnicas para modelar, filtrar y detectar tiempos de las señales acústicas y eléctricas provenientes de DP.

Con el objetivo de caracterizar la respuesta de las diferentes técnicas de procesamiento, se ha realizado una simulación basada en construir una serie temporal que contiene señales de DP con el ruido seleccionado.

El filtro wavelet universal es una herramienta potente que permite filtrar el ruido blanco cuando se desconocen las características de las señales a medir. Sin embargo, en situaciones donde el nivel de señal es bajo respecto al ruido, es posible que las componentes seleccionadas sean de ruido en vez de componentes de la señal objetivo, con lo que se pierde la medida.

El filtro wavelet específico es similar al filtro wavelet universal, pero tiene la ventaja de que se configura a partir de una señal patrón ya conocida. De esta manera se consiguen varias ventajas. La primera es que el filtro escoge solamente las componentes asociadas a la señal buscada y se evita de esta manera la presencia de otros ruidos, aunque tengan un nivel de señal elevado. La segunda es que permite identificar el tipo de DP eléctricas a partir de las componentes wavelet de cada una de ellas. Gracias a esta última ventaja, se pueden separar las DP internas de las DP superficiales a partir de una misma medida eléctrica. La tercera es que el filtro puede adaptarse a cualquier tipo de sensor sin necesidad de conocer las características del mismo; dada una forma de onda conocida de una DP, el filtro es capaz de auto-configurarse sin necesidad de introducir más datos.

Para que el filtro wavelet específico funcione correctamente es necesario que se cumplan dos requisitos. El primero es disponer de una señal patrón conocida que configure el filtro. Dicha señal patrón se puede encontrar buscando, en las series temporales adquiridas, aquellas señales que cumplan los siguientes criterios de forma simultánea: ¹coherencia de tiempos de las señales detectadas en los distintos canales (pertenencia a un evento patrón) y ²una señal suficientemente grande como para ser detectada por umbral. El segundo requisito necesario es disponer de un criterio evaluador que ordene y discrimine las componentes wavelet que contienen más información, de las que contienen principalmente ruido.

Se han estudiado tres criterios evaluadores para el filtro wavelet específico: el primero consiste en comparar la forma de onda independientemente de la energía usando el PMCC, el segundo compara la energía normalizada y el tercero compara la variable *Eval* resultante de multiplicar la energía normalizada por el PMCC. De los tres el que ha dado mejor resultado es la variable *Eval*, ya que la ordenación realizada es la que mejor se ajusta con el aporte de las componentes wavelet respecto a la señal de origen.

En cuanto a las técnicas de detección, la detección por energía ha demostrado que introduce poco retardo en la medida y no necesita de un patrón. Sin embargo, si existe una señal patrón con una forma de onda definida, la correlación cruzada es la técnica que ofrece mejores resultados aún sin necesidad de filtrar la adquisición.

Por último, las técnicas de filtrado tienen un consumo de recursos bastante similar, por lo que no es un elemento diferencial a la hora de elegir entre una y otra.

En cuanto a las técnicas de detección, el criterio de energía mínima ha demostrado que se consiguen mejores resultados en la medida respecto de la técnica basada en la envolvente, con un mínimo aumento de los recursos necesarios. Por otro lado, la correlación cruzada es la que mejores resultados ofrece en cuanto a precisión y exactitud, pero consume el doble de tiempo en cuanto a coste computacional.

Capítulo 5

Detección y localización de descargas parciales

5.1 Introducción

El objetivo del presente capítulo es desarrollar el estudio de las señales experimentales capturadas en la plataforma de ensayos, a fin de obtener información del estado del aislante y de predecir la presencia de zonas dañadas.

El principal problema para realizar el diagnóstico mediante la detección de las señales acústicas y eléctricas en el experimento, es que sólo se posee información de la estructura física de la cuba. Más allá de esa información, la cuba es una caja negra. Además, al ser las DP un proceso estocástico tanto en el tiempo como en el espacio, es necesaria una aproximación estadística cuyo resultado sea en términos de probabilidades, ya sea de encontrar DP en una región concreta o de detectar DP de un tipo específico.

Por tanto, es necesario diseñar un procesamiento que sea capaz de informar del estado del aislante a partir de una colección aleatoria de datos.

A continuación, se desarrolla el procedimiento completo para detectar, localizar e identificar la actividad de DP en un ensayo realizado en el laboratorio.

5.2 Configuración experimental

Se quiere estudiar la actividad de DP en el aislante para dos tipos de especímenes diferentes: DP internas y DP superficiales. Para ello, se utiliza el siguiente esquema:

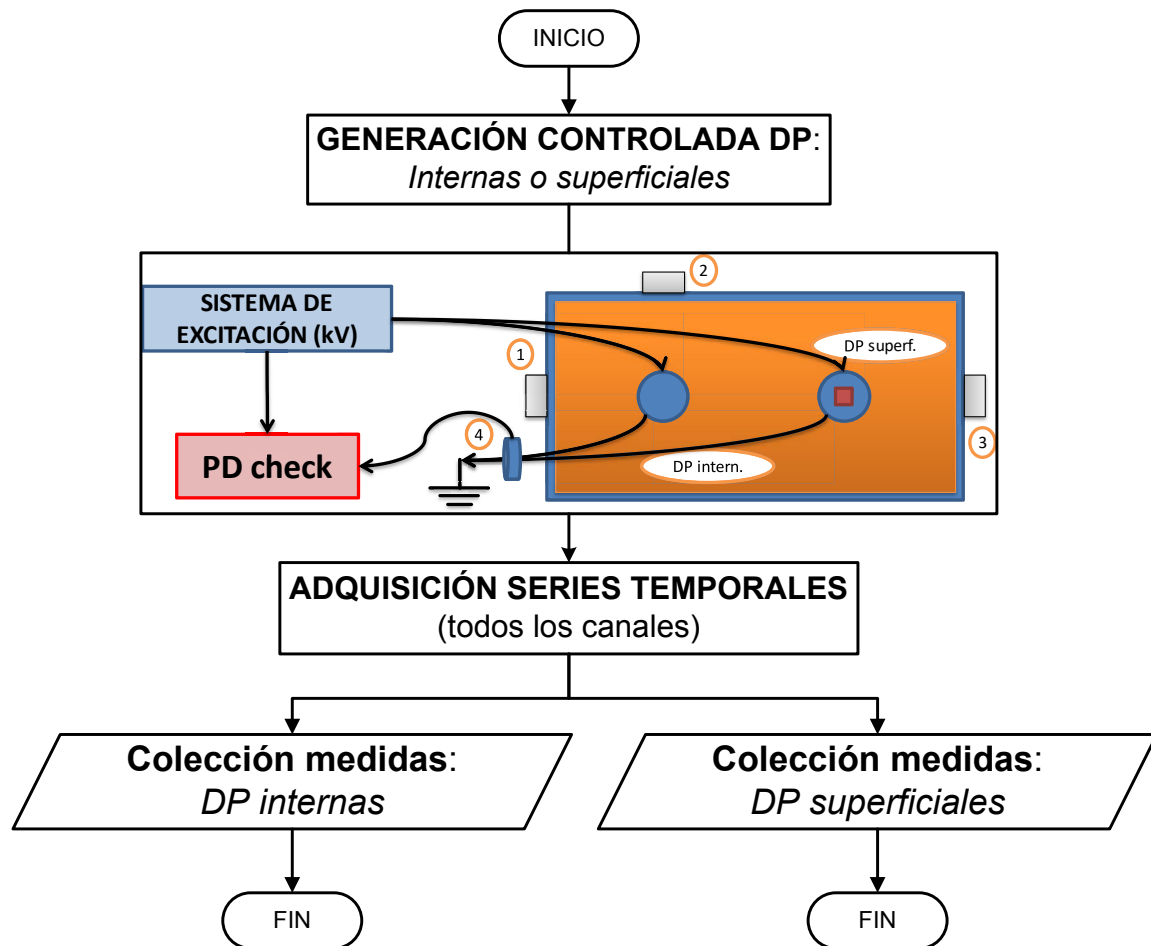


Figura 62. Esquema adquisición de datos.

El sistema de generación está en todo momento bajo la supervisión del sistema *PDcheck*, el cual garantiza la existencia de DP y además permite su clasificación entre

internas y superficiales. Mediante el sistema de excitación, se regula la tensión entre electrodos para garantizar la generación de DP del tipo deseado y con una actividad suficientemente baja para evitar, en la medida de lo posible, que varias DP se puedan solapar. Dado que los valores de PDIV y PDEV son distintos para cada elemento bajo estudio, se excita cada uno de ellos de forma individual para evitar o la nula actividad en uno de ellos o un exceso de actividad en el otro, lo que haría inviable la detección de eventos individuales.

Una vez que el sistema comienza a generar DP a una tensión ligeramente superior a su PDIV, se deja estabilizar durante 10 minutos

Para la detección de DP superficiales se observa que las señales acústicas tienen un nivel de SNR adecuado para la medida por lo que se opta por realizar 55 capturas de un ciclo de red completo (20 ms).

En cuanto a la detección de DP internas los niveles de SNR son muy bajos y la señal muchas veces no se distingue en los tres canales. Por ese motivo se opta por capturar 105 series temporales de un ciclo de red.

5.3 Evento patrón y señales patrón

Una vez se dispone de una colección de series temporales, se busca un evento que pueda asociarse a una DP, a este evento le llamaremos *evento patrón*. Este evento, a su vez, tiene asociado una *señal patrón* por cada uno de los canales que componen la medida experimental. A través de la señal patrón de cada canal se utilizarán técnicas de reconocimiento de patrones para detectar DP en las medidas realizadas.

El proceso utilizado para extraer las señales de DP a partir de las medidas es el siguiente:

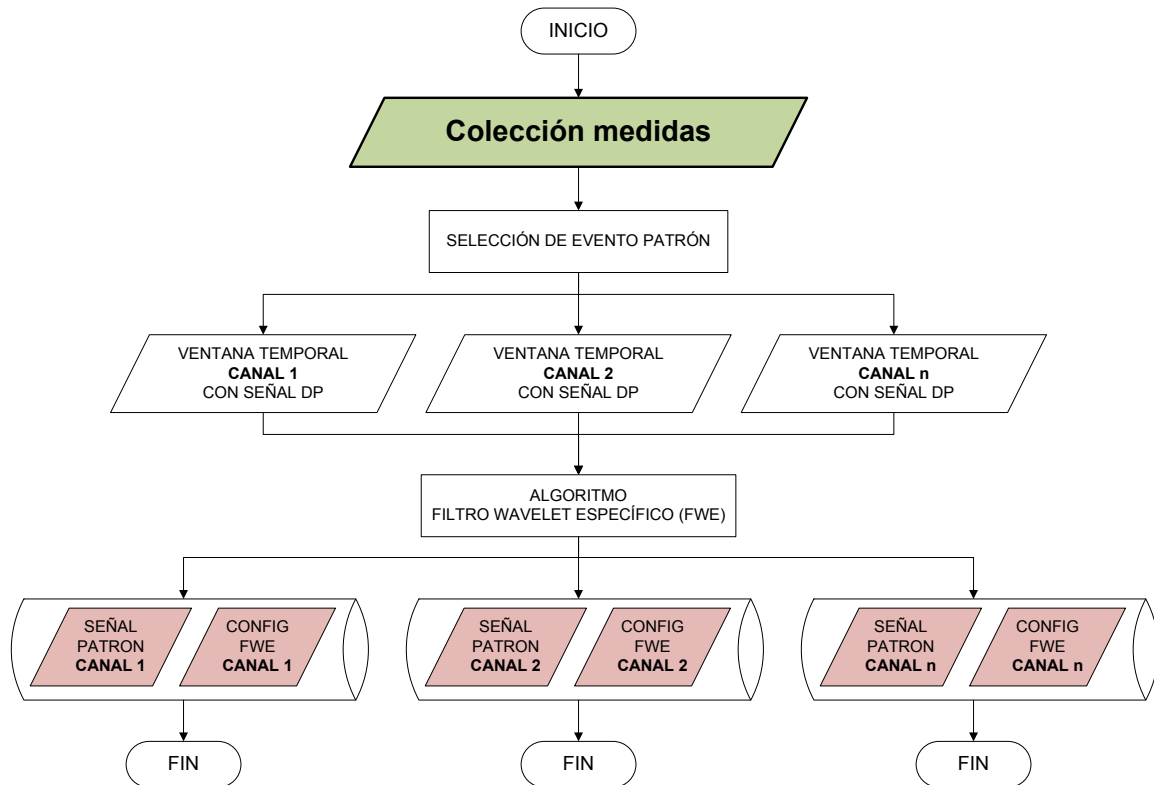


Figura 63. Selección de eventos de DP.

Para seleccionar el evento patrón, se escoge una medida de las realizadas en el experimento y se selecciona la misma ventana temporal en todos los canales adquiridos de tal forma que todos contengan una señal que pueda asociarse a una DP. Las características que debe cumplir este evento son: ¹debe ser aislado para evitar la superposición de señales en un mismo canal, ²debe tener suficiente amplitud de señal para poder ajustar una ventana temporal asociada a la DP en cada uno de los canales y ³la detección de tiempos de cada una de las señales debe ser coherente con los tiempos de vuelo esperados para una DP generada en el interior de la cuba.

La selección del evento patrón es, por tanto, importante, ya que implica la observación por parte del usuario de las adquisiciones y seleccionar aquellas que cumplan los requisitos ya expuestos, así como otros obtenidos a través de la experiencia como pueden ser una forma de onda reconocible en alguno o todos los canales (por ejemplo las señales acústicas suelen empezar con una característica forma de M) o repetitividad en los tiempos de vuelo observados (cuando las DP se generan en la misma región).

Aun así, hay métodos de búsqueda bastante eficientes, como puede ser la búsqueda de las medidas con mayor amplitud en uno o más canales. Aunque se ha comentado que no existe una relación directa entre la intensidad eléctrica y la acústica en un conjunto de

medidas [45, 46, 75, 76], generalmente se suele cumplir que una señal de gran intensidad eléctrica suele tener asociadas señales acústicas de mayor amplitud (aunque otros factores como la ubicación de la fuente y de los sensores afecte a la medida acústica).

En el Anexo A.III se presenta la interfaz de la aplicación *PDtool*, escrita en Matlab® y desarrollada dentro del marco de esta tesis, que cuenta con herramientas para facilitar la detección y selección del evento y señales patrón por parte del usuario.

Realizadas estas aclaraciones, se presenta un ejemplo representativo de un evento patrón escogido para señales DP internas y superficiales:

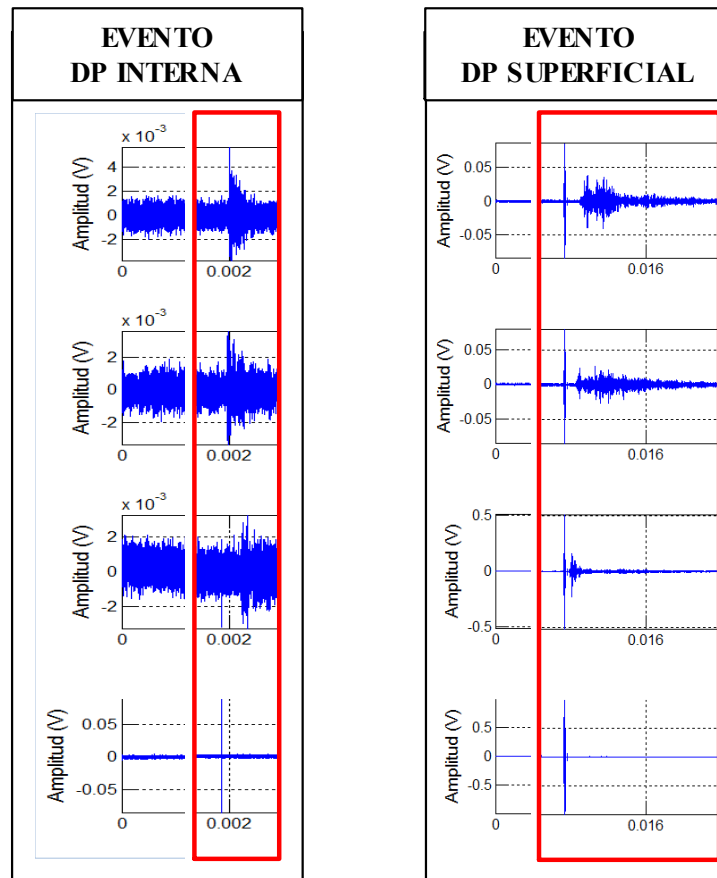


Figura 64. Selección de eventos de DP.

Una vez que un evento de DP es seleccionado, se escoge para cada canal una ventana temporal representativa de las señales de DP registradas por dicho canal. Dicha ventana temporal se utilizará, por un lado, para configurar el filtro wavelet específico y, por otro lado, para detectar la presencia de DP en todas las series temporales adquiridas mediante el empleo de la correlación cruzada. Como se ha explicado anteriormente, utilizando la

correlación cruzada se garantiza que no sólo se selecciona una señal DP candidata por una amplitud alta, sino que también influye la forma de onda de la misma.

A continuación, se muestra un ejemplo de las ventanas temporales escogidas para cada canal, para un evento patrón seleccionado:

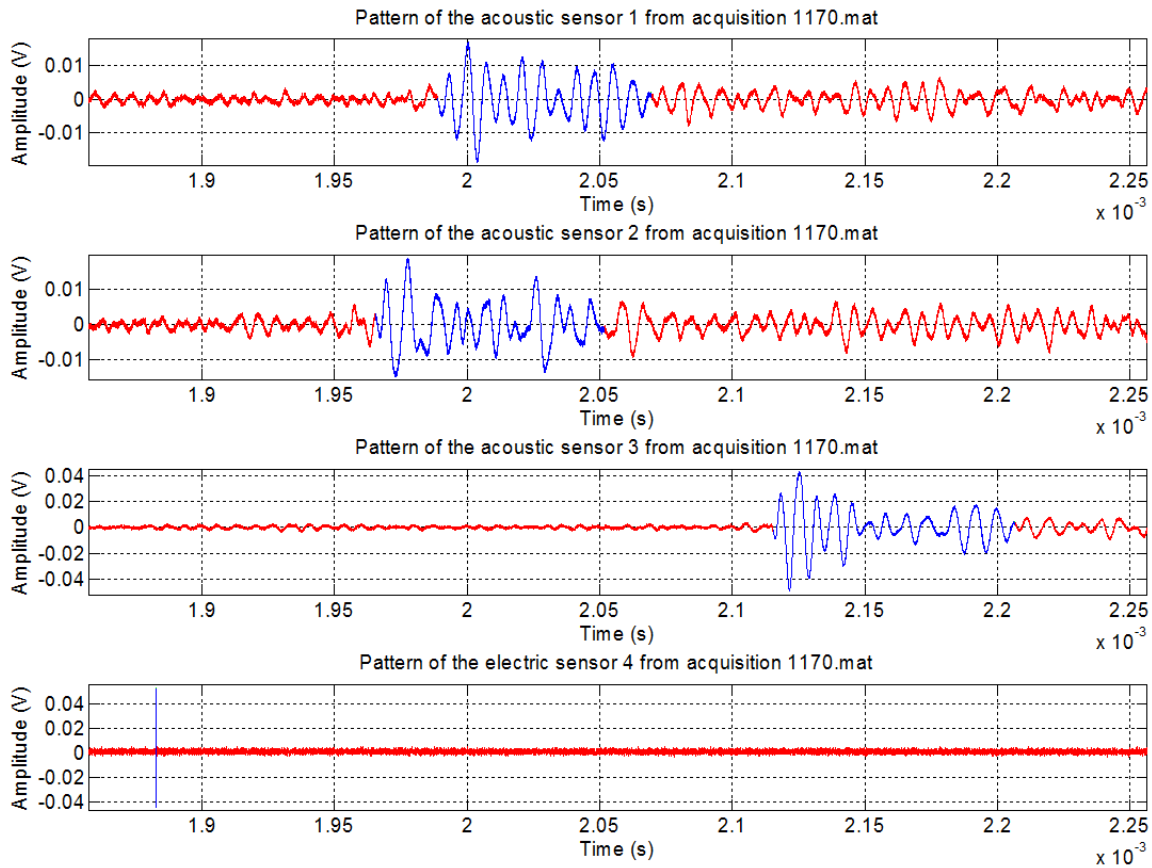


Figura 65. Ejemplo de formas de onda patrón seleccionadas por canal.

Cuando una forma de onda patrón por cada uno de los canales es escogida, entonces se utiliza el filtro wavelet específico. Dicho filtro wavelet específico, junto con la configuración obtenida al acondicionar las señales patrón se utiliza posteriormente para filtrar cada una de las medidas y optimizar de esa manera la detección de las señales generadas por las DP.

Finalizada esta parte del procesamiento, por cada uno de los canales se tiene una señal patrón y unos parámetros de configuración del filtro wavelet específico que se utilizarán a continuación.

5.4 Detección de señales

5.4.1 Esquema general

La técnica seleccionada para detectar DP en cada canal, consiste en utilizar la correlación cruzada entre las medidas y la señal patrón del canal correspondiente.

El máximo de la correlación cruzada de dos series aporta dos datos importantes: primero, el máximo se corresponde con aquellas ventanas temporales cuya forma de onda tiene el mayor parecido con la señal patrón y, segundo, el instante donde se mide el máximo de la correlación cruzada se corresponde, de forma sistemática, con el instante exacto donde la señal detectada comienza (por tanto, el inicio depende del conjunto de datos que conforman la forma de onda, y no de la amplitud en un único punto).

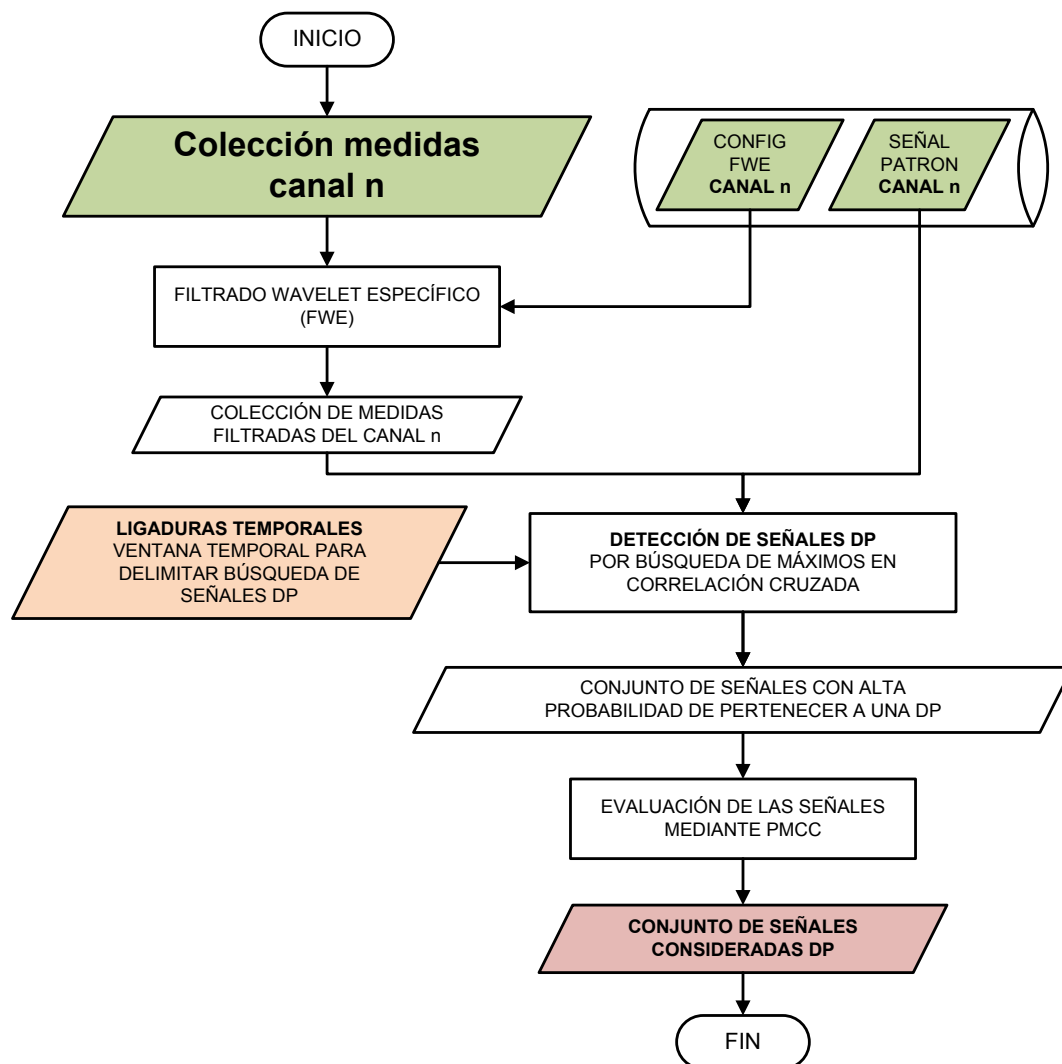


Figura 66. Diagrama de flujo para detectar DP en un único canal.

El algoritmo utilizado, en cada canal, para detectar señales candidatas a pertenecer a una DP es el mostrado en el diagrama de flujo de la Fig. 66.

Lo primero que se hace para mejorar el valor de la correlación cruzada y del PMCC es filtrar las adquisiciones utilizando el filtro wavelet específico; para ello, se utiliza la configuración del filtro wavelet obtenida al acondicionar los patrones de cada canal.

Una vez que las adquisiciones son filtradas, se calcula la correlación cruzada entre dichas adquisiciones y el patrón acondicionado para cada canal. Como se ha comentado en el apartado 4.3.1, los máximos en la amplitud de la correlación, se asocian con el instante de inicio de ventanas temporales similares a la señal patrón.

5.4.2 Detección de máximos en la correlación cruzada

Como se ha comentado en el apartado 4.3.1, los máximos de la correlación cruzada entre una señal patrón y una adquisición, se corresponden con el instante de inicio en la adquisición, de una forma de onda similar al patrón utilizado.

Por definición, el valor de la correlación cruzada (4.16) es una integral. Si usamos una señal patrón más corta que la adquisición, entonces los límites de dicha integral vienen determinados por la duración del patrón. Si tenemos en cuenta que la correlación cruzada se calcula desplazando la señal patrón desde $-t$ a $+t$, entonces tenemos que, dado un máximo en t_{\max_xcorr} la ventana temporal de influencia del patrón es:

$$vent_inf = [t_{\max_xcorr} - duración_patrón, t_{\max_xcorr} + duración_patrón] \quad (5.1)$$

Cuando la actividad es baja y no se solapan las señales DP, entonces basta con eliminar la ventana temporal de influencia, para pasar a buscar el siguiente (Fig. 67). Como resultado se obtiene que:

$$xcorr(vent_inf) = 0 \quad (5.2)$$

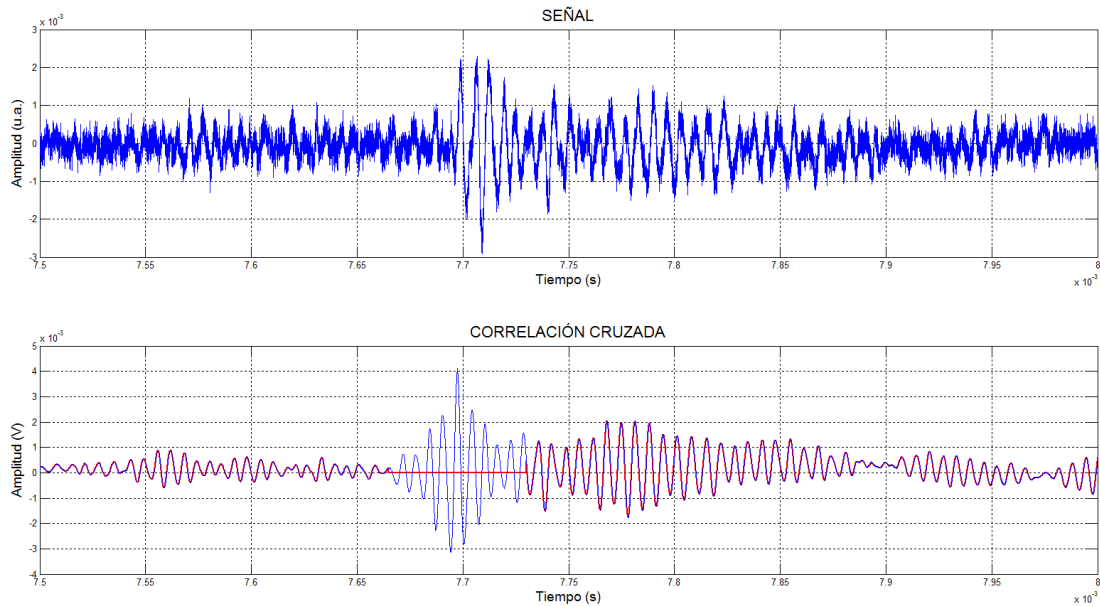


Figura 67. Partes eliminadas de la señal y de la correlación cruzada tras encontrar los máximos y eliminarlos de la correlación cruzada.

De esta forma, se pueden buscar los máximos asegurándonos de eliminar la señal DP, detectada en la correlación cruzada, completamente antes de buscar la siguiente.

Sin embargo, cuando la actividad es alta y se solapan las señales de las DP, eliminar completamente la ventana de influencia (5.2) puede provocar que eliminemos una señal solapada válida.

Para solucionar esto, la mejor aproximación consiste en restar la señal patrón directamente a la serie temporal bajo estudio, aprovechando que se conoce el instante de inicio. El problema de usar esta técnica es que, una vez restada la señal patrón a la adquisición, hay que volver a realizar la correlación cruzada, con el elevado coste computacional que eso conlleva para detectar una baja cantidad de casos.

Para evitar una solución excesivamente restrictiva, como (5.2) o un tiempo de cómputo excesivamente elevado, se opta por una solución más sencilla y rápida: para eliminar el máximo se multiplica la correlación cruzada por una función con forma de V. De esta manera, si existiera una segunda señal solapada en la correlación cruzada con suficiente magnitud, seguiría apareciendo un máximo, aunque éste haya sido atenuado por la función con forma de V.

La señal con forma de V tiene valor 1 en toda la duración de la correlación cruzada, excepto en el instante donde se ha hallado el máximo, que es donde la función V toma

valor 0; a partir de ese punto se definen las dos pendientes con la forma de V deseada (Fig. 68 superior).

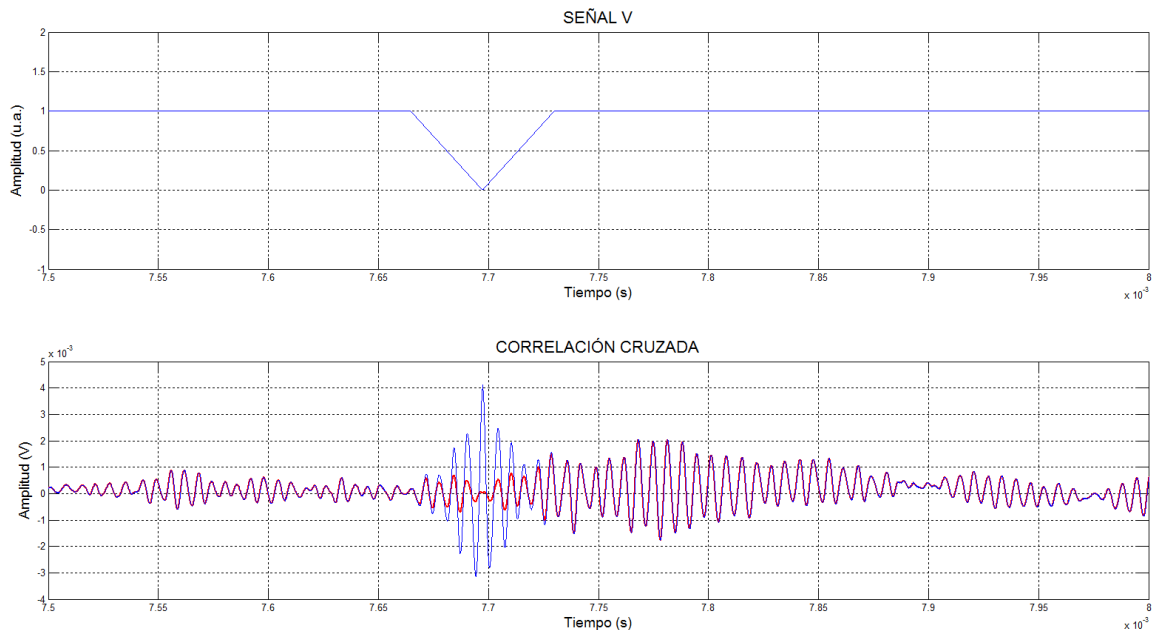


Figura 68. Resultado (inferior en rojo) de multiplicar la señal V por la correlación cruzada de color azul.

Si multiplicamos la función V por la correlación cruzada, obtenemos que ésta se hace 0 en el máximo y su grado de “atenuación” es menor a medida que nos alejamos de dicho máximo (Fig. 68 inferior). De esta manera, si existe una segunda DP solapada dentro del intervalo de la DP detectada anteriormente, hay posibilidades de detectarla si tiene la suficiente amplitud y está suficientemente separada del instante de inicio de la DP detectada anteriormente.

5.4.3 Ligaduras temporales

La correlación cruzada es una técnica que consume muchos recursos y dicho consumo se dispara cuantas más muestras contienen los vectores a comparar. Una manera de reducir dicho consumo, es limitar la ventana de búsqueda de señales. Para ello, es necesario: ¹elegir un canal de referencia (ya sea acústico o eléctrico), ²conocer las dimensiones físicas de la cuba y ³conocer la posición de los sensores utilizados.

Si se dispone de la información expuesta, a partir de las DP detectadas en el canal de referencia, se puede buscar en el resto de los canales en aquellas ventanas temporales,

cuyo tiempo de vuelo (resultante de restar el instante de inicio de la señal en el canal de referencia menos el instante de inicio de la señal en otro canal) sea coherente con una descarga generada dentro de la cuba o una región esperada dentro de la misma.

Dependiendo de cuál sea el canal de referencia utilizado, nos encontramos ante dos casos bien diferenciados: búsqueda con referencia eléctrica o búsqueda con referencia acústica (por ejemplo, sensor de fibra óptica cercano a la fuente de DP).

5.4.3.1 Referencia eléctrica

La ventaja de utilizar referencia eléctrica es que su medida se considera prácticamente instantánea. De este modo, el cálculo del retardo entre una señal DP acústica y la señal DP eléctrica asociada, se corresponde exactamente con el tiempo de vuelo entre el origen de la DP y el sensor (aportando la distancia de la DP al sensor y simplificando notablemente los cálculos de localización). Además, en entornos eléctricamente controlados (como en el laboratorio), la sensibilidad de la medida eléctrica es mejor que la acústica (siendo generalmente sus valores PDIV y PDEV de un valor inferior al acústico).

Por lo tanto, conocido el tiempo de inicio de la DP eléctrica $t_{inicio}(DP_{elec})$, tenemos que los inicios de las señales acústicas de las DP deben encontrarse dentro de la siguiente ventana:

$$t_{inicio}(DP_{acus}) \in \left[t_{inicio}(DP_{elec}), t_{inicio}(DP_{elec}) + \frac{\max_dist_cuba}{v_{sonido}} \right] \quad (5.3)$$

Esta condición es común a todos los canales acústicos, aunque se puede acotar aún más utilizando la posición de los sensores acústicos o la ubicación esperada de la fuente.

5.4.3.2 Referencia acústica

Hay veces, sin embargo, en las que la referencia acústica es mejor ya sea porque el entorno sea eléctricamente ruidoso o porque se posee un sensor de fibra óptica dentro de la cuba.

Si tenemos, por tanto, una referencia acústica, la ventana temporal para encontrar la señal eléctrica de la DP será:

$$t_{inicio}(DP_{elec}) \in \left[t_{inicio}(DP_{acus}) - \frac{\max_dist_cuba}{v_{sonido}}, t_{inicio}(DP_{acus}) \right] \quad (5.4)$$

La ventana temporal para el par el resto de sensores acústicos será:

$$t_{inicio}(DP_{acus2}) \in \left[t_{inicio}(DP_{acus1}) - \frac{dist_sensores}{v_{sonido}}, t_{inicio}(DP_{acus1}) + \frac{dist_sensores}{v_{sonido}} \right] \quad (5.5)$$

La ecuación (5.5) limita el tiempo máximo que puede haber entre dos señales acústicas debido a la distancia que hay en línea recta entre ambos sensores.

Así pues, utilizando las ecuaciones (5.3), (5.4) y (5.5) se reduce de forma drástica el tiempo de procesamiento en el cálculo de la correlación cruzada y del filtrado wavelet.

5.4.4 Evaluación de las señales detectadas

En esta parte del procesamiento se estudia la validez de los máximos encontrados en la correlación cruzada.

Uno de los problemas asociados a la detección por correlación cruzada es la dependencia del valor resultante con la energía que contienen las señales bajo estudio; para filtrar señales de gran energía, pero poca similitud en la forma de onda, se calcula el PMCC entre la señal encontrada y el patrón.

Como se ha explicado anteriormente, el PMCC es un valor normalizado (entre 0 y 1), que evalúa el parecido en la forma de onda de dos señales de la misma longitud independientemente de su energía. Si el valor absoluto del PMCC es cercano a uno entonces la señal encontrada en la adquisición es muy similar al patrón; si el valor está muy cercano a cero, entonces ambas formas de onda son distintas y no provienen de la misma fuente.

Por tanto, se utiliza el valor de PMCC para decidir si una señal es válida o no. Para ello, se fija un valor umbral de validez comprendido entre 0.6 y 0.9 que se corresponde a señales que probablemente provengan de la misma fuente que el patrón o de una muy cercana.

Las señales encontradas válidas por el algoritmo se almacenan y parametrizan en una base de datos para su posterior procesamiento. Los datos típicos almacenados son: amplitud máxima, valor del PMCC entre la señal detectada y su patrón asociado, medida asociada, tiempo de inicio y de fin asociado; con el objetivo de realizar una base de datos que permita realizar estadísticas o identificación y clasificación de las mismas.

El siguiente paso, una vez que se posee la colección de señales DP, es emparejarlas entre los distintos canales para construir eventos que permitan calcular tiempos de vuelo y de ahí, localizar el origen de las DP para estudiar si el aislante pudiera estar dañado.

5.5 Localización de defectos en el aislante

5.5.1 Localización por asociación de señales de todos los canales: reconstrucción de eventos

Una vez que se posee una colección de señales de DP en distintos canales, el objetivo es asociar una única señal de DP por canal con una única señal de DP de cada uno del resto de canales. De esta forma, se obtiene una colección de eventos de DP (similares al evento patrón almacenado al principio), que permite localizar el origen de las señales por triangulación [6, 22].

Sin embargo, no es directa la asociación de las señales generadas por una misma DP para cada uno de los canales. Se han realizado varias pruebas que permiten analizar cuáles son los posibles eventos que se obtienen al fijar únicamente las ecuaciones de limitación temporal (5.3), (5.4) y (5.5). Cuando existen varias señales asociadas a una misma referencia, entonces se elige aquella que arroja mayor valor de la función *Eval*.

Para analizar este problema de la asociación de señales de distintos canales, se ha realizado un experimento con dos sensores acústicos a la misma altura que la región aislante donde se generan DP internas y utilizando un sensor eléctrico de referencia; es decir, se reduce a un sistema de localización 2D con referencia eléctrica.

El resultado de la medida se resume en la Fig. 69 que muestra la localización de eventos individuales asociados a DP en las dos dimensiones correspondientes a la vista de planta de la cuba. En ella se ve una gran colección dispersa de eventos DP rechazados por el algoritmo (en verde) y en menor cuantía aquellos seleccionados por el algoritmo (en azul). Aunque la mayoría de los seleccionados cae dentro de la región aislante (círculo grande azul), aparecen varios falsos positivos fuera del aislante porque, por un motivo u otro, al menos uno de los canales ha fallado en la detección del mismo evento DP.

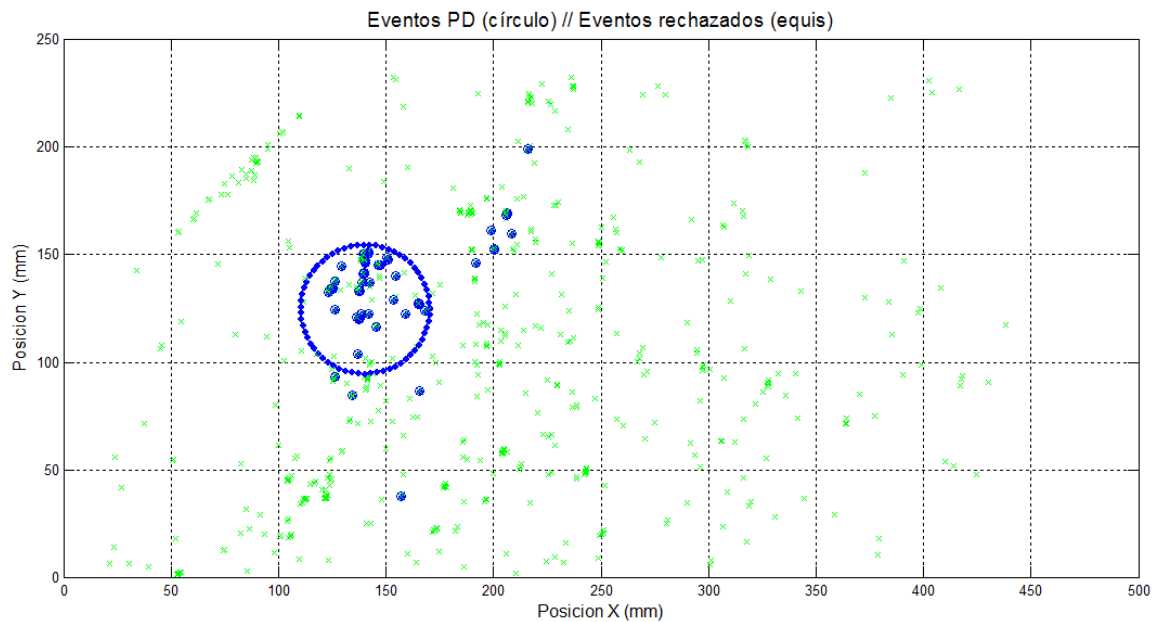


Figura 69. Ejemplo de localización por triangulación. En verde aparecen los eventos rechazados y en azul los seleccionados por el criterio mínimo de PMCC

Varias son las causas que pueden provocar la detección errónea en alguno de los canales:

1- Bajos niveles de señal para la detección acústica. Aunque la correlación cruzada es una herramienta bastante potente para detectar señales a niveles muy cercanos al ruido, es verdad que, a veces, las señales DP detectadas en cualquiera de los canales o no se corresponden con la misma DP de otros canales o directamente son ruido con una forma de onda parecida al patrón.

2- Incorrelación entre la señal acústica y la eléctrica que permita una mejora en los criterios de asociación de los canales más allá de los tiempos esperados por la geometría de la cuba

3- Necesidad de tener una colección de muestras suficientemente representativas de la actividad, que obliga a fijar umbrales de detección de la señal muy cercanos al ruido.

4- Incremento en la dificultad de asociar correctamente todas las señales DP de un mismo evento DP, a medida que aumenta el número de canales de medida.

Ante esta situación, surge la duda razonable de si el sistema está detectando alguna señal DP en los canales de medida y si la cantidad de señales detectada es suficientemente significativa como para representar un fallo en el aislante.

Viendo que la opción de encontrar eventos DP válidos es bastante compleja sin el apoyo de sensores más selectivos o técnicas de procesamiento más complejas, se busca una técnica que permita extraer información útil sobre la localización del fallo en el aislante, aunque sea a través de eventos incompletos o pseudo-eventos (como son la mayoría de los detectados).

5.5.2 Localización de regiones de actividad alta: construcción de la matriz tridimensional de eventos

Esta aproximación requiere un cambio de paradigma, ya que el sistema deja de ser un conjunto de sensores sincronizados que detectan una misma DP, a ser un conjunto de sensores que miden de forma independiente DP, si bien todos sincronizados a un mismo canal de referencia (que puede ser eléctrico o acústico).

El sistema procesará entonces pares como los del siguiente ejemplo:

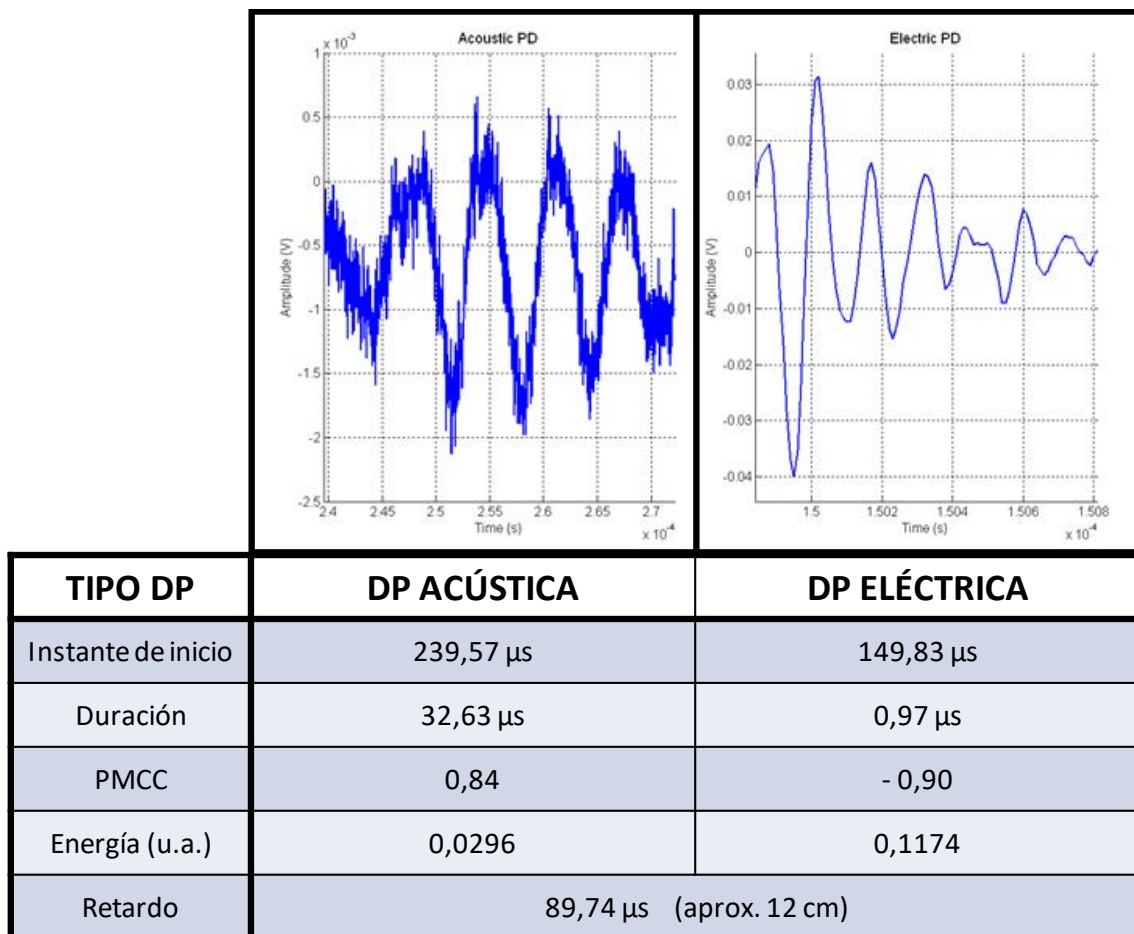


Figura 70. Ejemplo de conjunto de dos medidas asociadas a una misma DP

Como la única medida que vamos a tener es el conjunto de retardos entre un sensor con su referencia, en vez de tener una localización 3D, obtendremos un histograma de retardos. Este histograma aporta información sobre si existe un conjunto de retardos característicos, que sean significativos de la presencia de un fallo localizado.

Utilizando el ejemplo de la Fig. 70, se utiliza la señal eléctrica como referencia de tiempos y las señales acústicas DP detectadas en el sensor 1. Como resultado obtenemos el siguiente histograma:

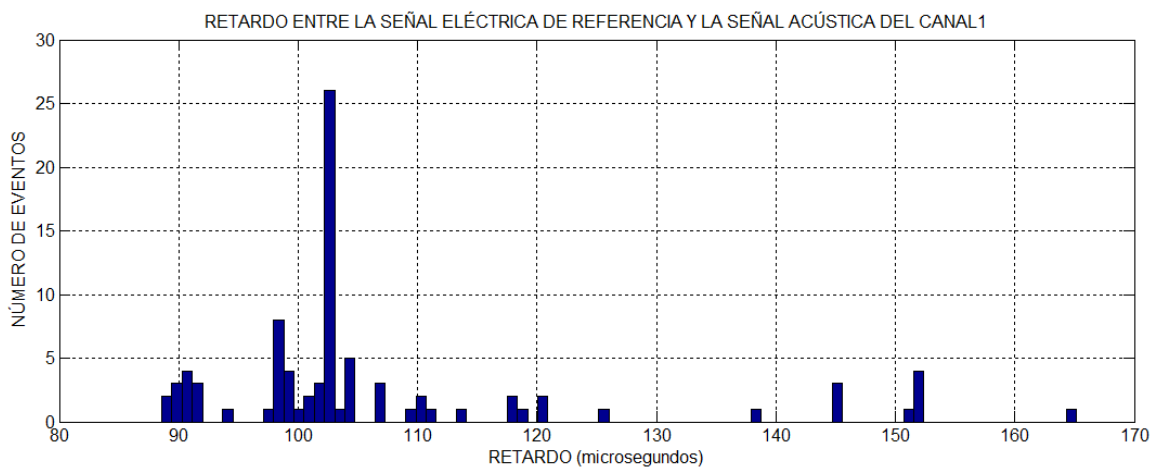


Figura 71. Histograma entre un sensor acústico y su referencia eléctrica

Del histograma de la Fig. 71, extraemos como conclusión que existe una región a 103 μ s donde se han detectado varios eventos DP de forma sistemática. Si además la referencia es eléctrica, para cada uno de los retardos podemos construir esferas concéntricas (2.2) de radio (2.5) cuyo centro es la posición del sensor y cada superficie de estas esferas tendrá asociado el número de eventos dado por el histograma.

5.5 Localización de defectos en el aislante

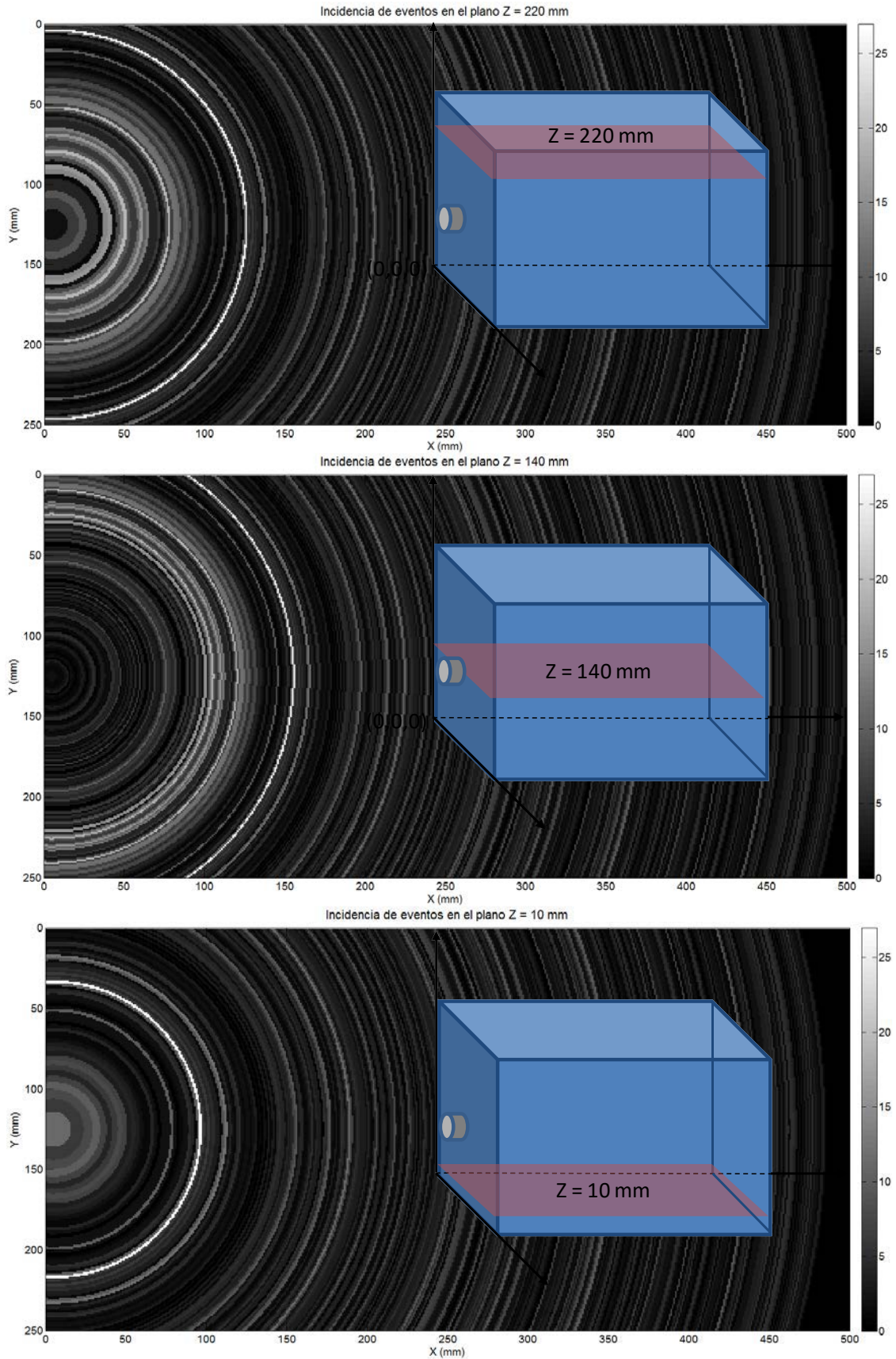


Figura 72. Proyección espacial del histograma de la Fig. 71 realizando cortes en planos Z constante

En la Fig. 72 se observa que las esferas, en realidad, se convierten en “semi-esferas” al aplicar las condiciones de contorno (esto es, la fuente no se puede encontrar fuera de la cuba). Al realizar cortes en el eje Z lo que sucederá es que nos encontramos semi-circunferencias concéntricas cuyo color está asociado al número de eventos dado por el histograma. De esta forma, el histograma se “transforma” en un vector de densidad de eventos desde la posición del sensor, hacia el interior de la cuba en forma de semi-esferas.

Al final, con el histograma del sensor y su ubicación, podemos asociar a cada punto de la cuba $P = (x_p, y_p, z_p)$ un número de eventos determinado. En el caso que estamos estudiando se tiene que la cuba tiene las siguientes dimensiones (500 mm largo, 250 mm ancho y 220 mm altura aceite); además se opta por pasos de 1 mm. De esta manera tendremos una colección de puntos (x, y, z) donde las coordenadas x, y, z adoptarán los valores:

$$x_p = 1, 2, 3 \dots 500 \quad (5.6)$$

$$y_p = 1, 2, 3 \dots 250 \quad (5.7)$$

$$z_p = 1, 2, 3 \dots 220 \quad (5.8)$$

Para conocer cuál es el número de eventos asociado a cada punto P de la cuba, primero tendremos que realizar un cambio de base, de tal forma que los puntos se escriban tomando como origen de coordenadas la posición del sensor:

$$x_p' = x_p - x_{sensor} \quad (5.9)$$

$$y_p' = y_p - y_{sensor} \quad (5.10)$$

$$z_p' = z_p - z_{sensor} \quad (5.11)$$

Una vez realizado el cambio de base, obtenemos que cada punto $P = (x_p, y_p, z_p)$ tiene asociado un número de eventos dado por:

$$N_{eventos}(x_p, y_p, z_p) = histograma \left(\frac{\sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2}}{v_{sonido}} \right) \quad (5.12)$$

De esta forma, una vez que tenemos un valor de eventos asociado a cada punto P de la cuba, obtenemos que la actividad detectada por un sensor dentro de la cuba, queda representada por una matriz tridimensional de eventos $N_{eventos}(x_p, y_p, z_p)$.

Las ventajas de utilizar la matriz tridimensional de eventos son las siguientes:

1- La primera ventaja y más importante es que si hay n sensores ubicados en la cuba, la matriz de eventos queda de la siguiente manera:

$$N_{TOTAL_eventos}(x_p, y_p, z_p) = N_{S1_eventos} + N_{S2_eventos} + \dots + N_{Sn_eventos} \quad (5.13)$$

Por lo tanto, ya no importa que las señales DP estén ligadas en todos los canales de forma simultánea. Cada canal verá un fragmento de la información, y al sumar “todos los fragmentos” se observará dónde se concentra la actividad.

2- Las regiones más dañadas del aislante, serán aquellas en las que el valor de la matriz $N_{TOTAL_eventos}(x_p, y_p, z_p)$ sea máximo. Por lo que buscar dichas regiones es un proceso rápido.

3- Tal y como hemos configurado la cuba, la matriz tiene una resolución de 1 mm^3 o, lo que es lo mismo, tiene 27.500.000 puntos ($500 \times 250 \times 220$). Este valor puede reducirse o aumentarse en función de la resolución deseada y de la potencia de cálculo disponible. Por ejemplo, si se pretende una resolución de 1 cm^3 , entonces la matriz de eventos será de 27.500 puntos ($50 \times 25 \times 22$). De hecho, una de las mejoras posibles es realizar una matriz de eventos de “baja resolución”, buscar el máximo; una vez acotada la región del máximo, se puede hacer un estudio con más detalle bajando a una resolución menor en dicha región.

4- Permite utilizar otras referencias temporales no instantáneas como puede ser un sensor acústico (ya sea interno o externo); eso sí, al ser la referencia acústica no instantánea, las nuevas superficies equitemporales del histograma dejarán de ser esféricas.

5- Esta técnica permite también ajustar los resultados de la matriz de eventos a la visibilidad de los sensores, permitiendo modificar las semi-esferas genéricas por conos direccionales (más acordes a su direccionalidad o al ángulo crítico debido a la diferencia de velocidades de propagación).

Por todo ello, se opta por utilizar la matriz tridimensional de eventos; ya que una vez calculada, se puede hablar de actividad en regiones concretas del aislante y, en caso de concentración de eventos, de la existencia de una zona dañada en el aislante.

5.6 Conclusiones

En el este capítulo se ha presentado el algoritmo utilizado para detectar señales de DP en entornos experimentales.

Para probar el algoritmo se ha configurado la plataforma experimental con un espécimen de DP internas y otro de superficiales. Aunque se ha intentado realizar una excitación común, no ha sido práctica por la diferencia de PDIV: al intentar generar DP superficiales, se provoca una excesiva actividad de DP internas. Por tanto, la excitación de especímenes se ha hecho de forma individual ajustando los valores de excitación a los valores de PDIV de cada espécimen. En estas condiciones se ha adquirido un conjunto de series temporales para cada uno de ellos.

Se han aislado eventos patrón; son sucesos aislados con niveles de señal altos y detectados en todos los canales con tiempos de retardo coherentes con la configuración geométrica. De los eventos patrón se extraen las señales patrón para cada uno de los canales, las cuales permiten configurar el filtro wavelet específico para procesar las series temporales adquiridas.

Para detectar las señales DP, se utiliza la correlación cruzada entre la señal patrón filtrada y las series temporales adquiridas filtradas. El inicio de la señal DP se corresponde con el máximo de la correlación cruzada. Una vez encontrada la señal se multiplica la función correlación cruzada por una función V ; de esta forma son desechadas las señales que se inician cerca de la señal detectada (posibles reverberaciones e interferencia de eventos) y es más probable detectar señales adicionales de DP separadas temporalmente.

Por otro lado, la correlación cruzada es una técnica que consume muchos recursos. Para agilizar el algoritmo, se utilizan las señales DP de la referencia en combinación con las ligaduras temporales (5.3), (5.4) y (5.5) para definir ventanas temporales de búsquedas reducidas, frente a la alternativa de usar la señal adquirida completa.

Detectar “eventos completos” de DP resulta especialmente complicado: aparte de los problemas señalados anteriormente, la generación en ráfagas dificulta la asociación de distintas señales detectadas con el mismo evento DP. En consecuencia, cuando sólo se tiene como elemento discriminatorio la coherencia temporal, el número de señales posibles es mucho mayor que el número de señales reales Fig. 69. A priori, seleccionar

por el valor máximo de la función *Eval* ha dado como resultado la selección de un conjunto de datos aceptable; sin embargo, son rechazados de este conjunto muchos puntos válidos como consecuencia de haber sido detectados con peor calidad en uno de los sensores.

Para evitar la influencia que tiene la medida en un sensor sobre la interpretación conjunta de medidas (esto es, una DP no detectada en un sensor hace que se deseche la información contenida en el “evento completo”), se opta por una aproximación que utilice de manera desagregada la información de la localización. Es decir, en vez de detectar un punto en el espacio a través de una señal de referencia y la medida de tres tiempos de vuelo (cuatro sensores), se opta por obtener tres histogramas de tiempo utilizando la señal de referencia y el cálculo del tiempo de vuelo de cada uno de los sensores acústicos. Adicionalmente, esta aproximación está en consonancia con el carácter estocástico de la generación de DP. De esta forma, en lugar de obtener un punto por cada DP aislada utilizando cuatro sensores, se obtienen tres esferas concéntricas donde cada una de las capas de las esferas se corresponde con la probabilidad de encontrar una DP en dicha superficie.

Al final del proceso, en vez de tener una colección de puntos dentro de la cuba asociados cada uno de ellos a una DP, tendremos una matriz de eventos por cada pareja de sensores (histograma de tiempos). La probabilidad de encontrar una DP en una región vendrá determinada como la suma de matrices de eventos de cada uno de los histogramas obtenidos independientemente del número de sensores utilizados.

Capítulo 6

Monitorización de la actividad de descargas parciales en la plataforma de ensayos

6.1 Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en la detección y localización de DP internas y superficiales.

Para realizar la medida se configura la plataforma experimental utilizando cuatro sensores: un sensor eléctrico que sirve como referencia eléctrica y tres sensores acústicos externos que se colocan de forma que tengan visibilidad simultánea de una fuente de generación de DP internas y otra de generación de DP superficiales.

CAPÍTULO 6: Monitorización de la actividad de descargas parciales en la plataforma de ensayos

Los equipos de adquisición utilizados son dos módulos de *Cleverscope* sincronizados para realizar la medida simultánea de los cuatro canales. El tiempo de adquisición es 20 ms, que se corresponden con un ciclo de red, a una frecuencia de muestreo de 100 MSps (suficiente para muestrear tanto las señales acústicas como las eléctricas).

El sistema utilizado para realizar la detección de las DP es el siguiente:

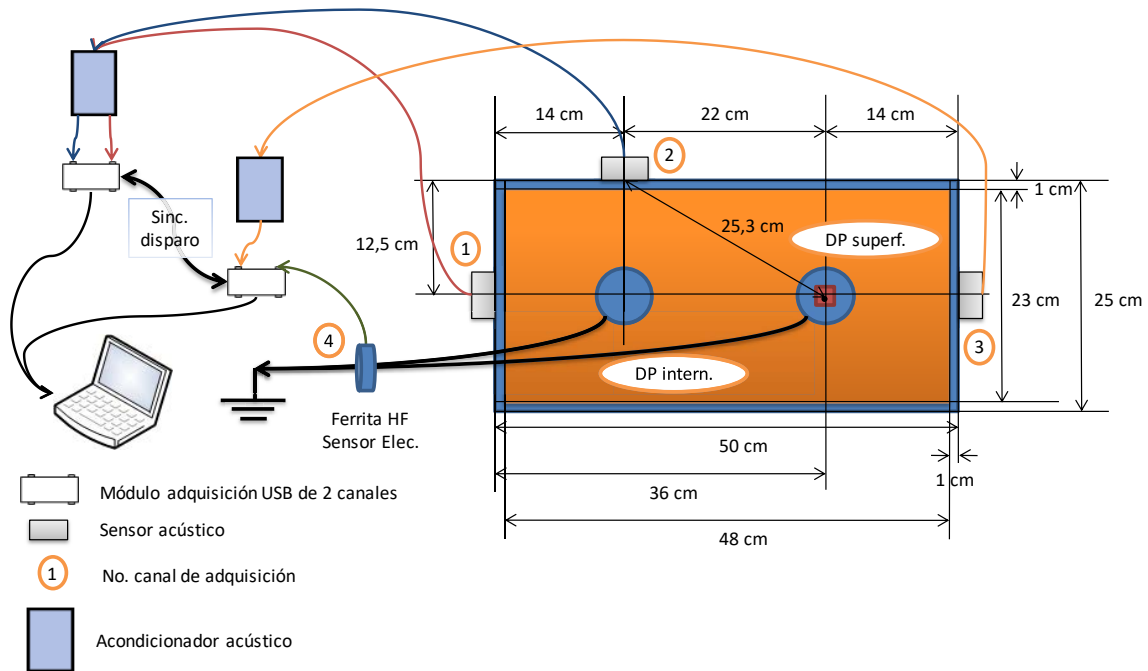


Figura 73. Sistema bajo estudio

Aunque en el experimento se ha tratado de generar DP internas y superficiales a partir de una excitación común, en la práctica el PDIV de las DP internas resulta ser inferior al de las superficiales. Cuando se intenta alcanzar el PDIV de las DP superficiales (en torno a 5 kV con la configuración actual), la actividad de las DP internas es muy elevada imposibilitando su estudio a partir de eventos individuales.

6.2 Detección y localización de descargas parciales internas

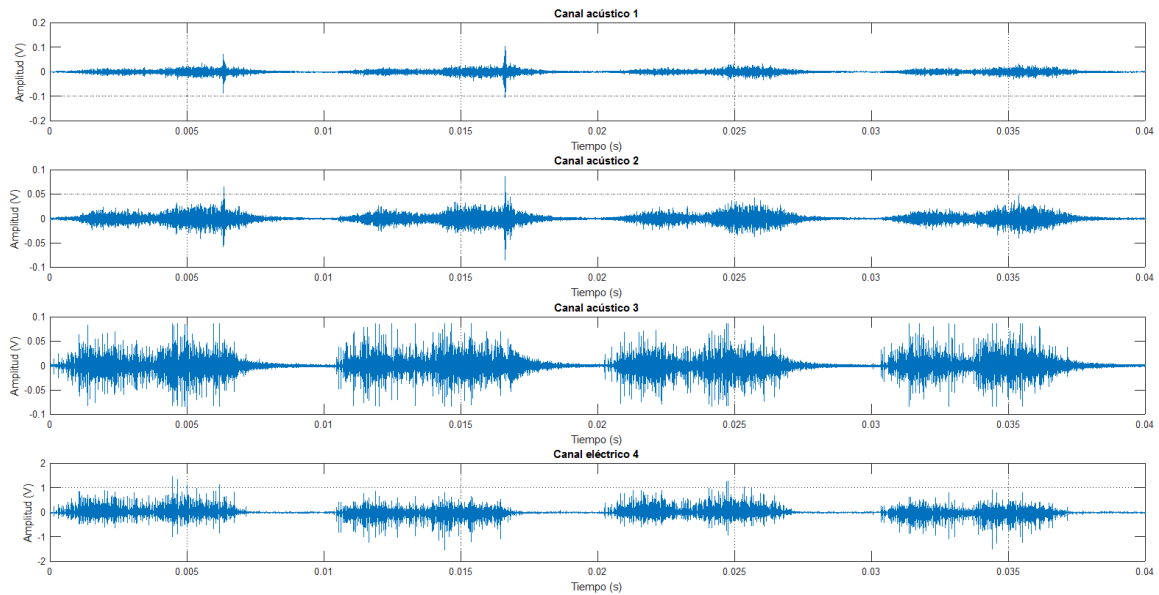


Figura 74. Captura ejemplo de la generación simultánea de DP internas y superficiales a 5 kV. Los 3 canales superiores son acústicos y el inferior eléctrico. Tiempo de adquisición 40 ms a una frecuencia de muestreo de 50 MSps.

A continuación se presentan los resultados por separado, primero con el sistema de generación de DP internas a su PDIV correspondiente (unos 3,5 kV) y posteriormente, el sistema de generación de DP superficiales (unos 5,1 kV).

6.2 Detección y localización de descargas parciales internas

Para analizar el estado del aislante se han adquirido 105 medidas con una duración de 20 ms a 100 MSps en cada uno de los cuatro canales de forma simultánea.

La pre-configuración del filtro wavelet es: wavelet madre *Daubechies20* y descomposición máxima de orden 20.

6.2.1 Selección del evento patrón

De las 105 medidas se selecciona el siguiente evento, debido a sus niveles de señal y coherencia de tiempos:

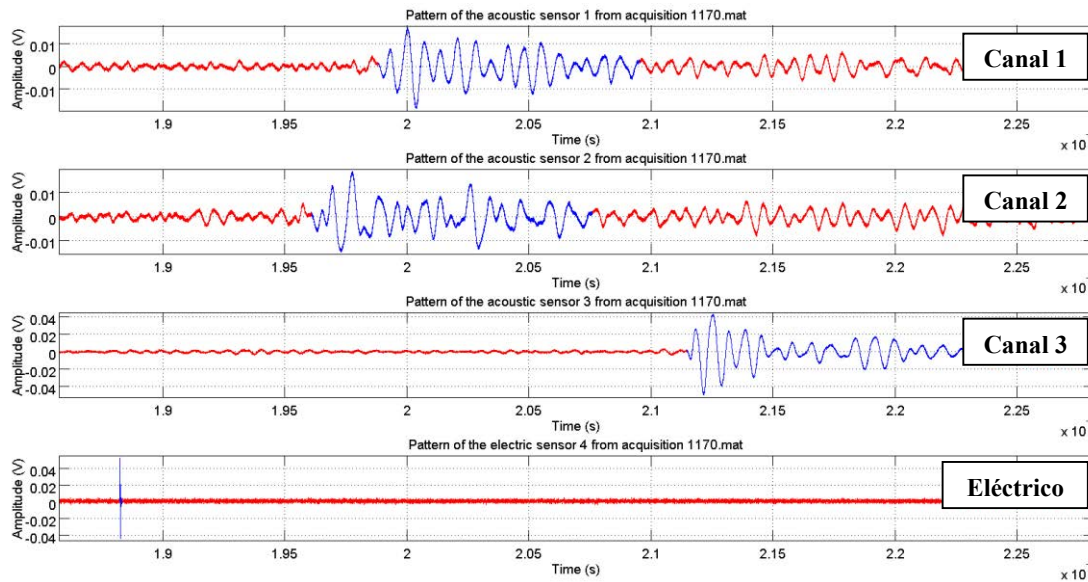


Figura 75. Evento patrón de descarga parcial interna.

El evento patrón es acondicionado y parametrizado para cada uno de los canales con el objeto de poder compararlo con las señales DP que se detecten posteriormente en cada uno de los canales:

6.2 Detección y localización de descargas parciales internas

Nombre del fichero patrón	1170001	1170002	1170003	1170004
Señal de origen	1170	1170	1170	1170
Canal del patrón	1	2	3	4
Acústico = 1 // Eléctrico = 0	1	1	1	0
PMCC entre el patrón filtrado y sin filtrar	0,96	1	1	1
Amplitud patrón (mV)	27,3	32,5	75,8	101,0
Energía patrón (u.a.)	588,6	574,5	1295,2	139,8
Ordenes filtro wavelet	9	9, 10	9	3, 5, 6, 2, 4
Frecuencia central patrón (KHz)	146,5	103,8	146,5	5468,8
Potencia en la Fc (dBm)	-17,03	-21,20	-13,45	-10,80
Índice de inicio patrón	198829	196096	211474	188254
Índice de fin patrón	209520	207581	223135	188324
Duración (microsegundos)	106,91	114,85	116,61	0,700
Instante inicio patrón (microsegundos)	1988,3	1960,9	2114,7	1882,5
Retardo (microsegundos)	105,8	78,4	232,2	0
Distancia estimada DP (mm)	146	108	320	-
'X sensor pos (mm)'	0	140	500	-
'Y sensor pos (mm)'	125	0	125	-
'Z sensor pos (mm)'	130	135	150	-

Tabla 6. Datos extraídos del evento patrón DP internas

En la Tabla 6 están parametrizados los datos del evento patrón y sus señales DP asociadas a cada canal. Es interesante destacar que la señal observada por el sensor 3 es de mayor amplitud que las de los sensores 1 y 2. De este dato se extrae que esta descarga ha tenido que ser generada en el extremo del electrodo más cercano al sensor 3 (datos que corroboran los retardos) y que, además, la atenuación por propagación en el aceite es menor que la propagación a través del papel entre electrodos.

Otro detalle interesante a comentar es, que mientras en los sensores 1 y 3 sólo aparece seleccionada la descomposición 9, en el canal 2 aparecen seleccionadas las descomposiciones 9 y 10. Comparando visualmente las formas de onda y atendiendo a que la descomposición 10 se corresponde a un pico en la frecuencia de 120 kHz, podemos afirmar que en el canal 2 hay una distorsión provocada a que existe una señal transversal, propagada por la pared, de magnitud equiparable a la señal longitudinal que queremos medir.

6.2.2 Análisis de las medidas

En este experimento se han analizado 105 medidas con el evento DP seleccionado, y se han detectado los pares electro-acústicos por cada canal acústico utilizando sus respectivos patrones forma de onda. Al aplicar el algoritmo se obtuvo que se encontraran el siguiente número de señales:

Canal acústico	Número de eventos detectados	Número de pares obtenidos
1	421	1680
2	416	1660
3	421	1681

Tabla 7. Número de señales DP internas detectadas

Para realizar los histogramas que se presentan a continuación se ha optado por tomar pasos de 2 mm. El motivo de tomar esta decisión es que la máxima distancia en un cubo de 1 mm de arista es 1,73 mm, por ello, al tomar los pasos de dos milímetros, nos aseguramos que no van a existir discontinuidades en ninguna de las direcciones.

Los resultados se enseñan en las gráficas siguientes.

6.2 Detección y localización de descargas parciales internas

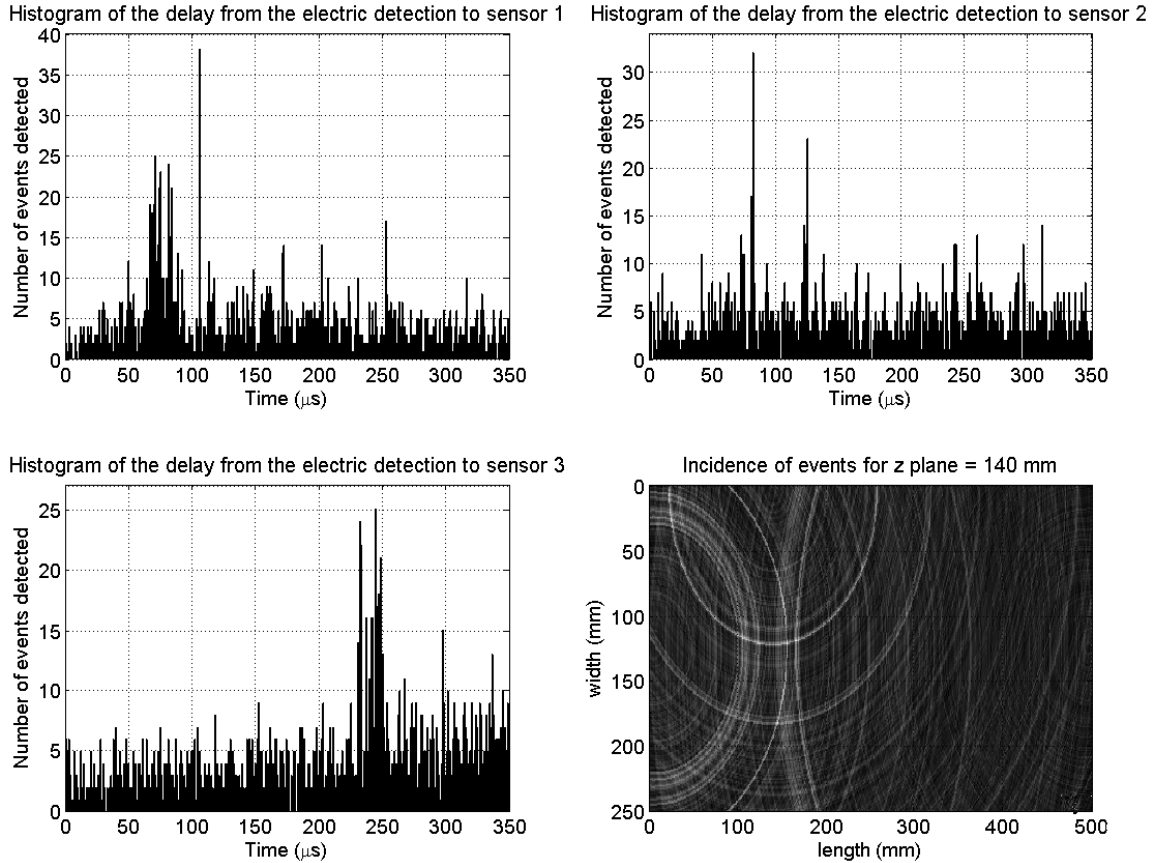


Figura 76. Histograma de los 3 sensores acústicos y su retroproyección asociada a la altura de la región donde se generan las DP ($z = 140\text{mm}$).

Para el sensor 1, los eventos que se han detectado en torno a $106\ \mu\text{s}$ son los más numerosos. También existe un conjunto de valores altos entre 70 y $90\ \mu\text{s}$ aproximadamente. El motivo de que esto sea así, es que los electrodos tienen un diámetro de $60\ \text{mm}$, por lo que es posible que existan varias fuentes de emisión, aunque la fuente de $106\ \mu\text{s}$ sea la más probable.

Para el sensor 2 existen dos picos claramente diferenciados a $84\ \mu\text{s}$ y a $126\ \mu\text{s}$. Por el contrario, no aparece un conjunto de señales concentradas en una región más amplia como sucede con el sensor 1. El pico a $126\ \mu\text{s}$ se interpreta como un rebote con algún elemento de los electrodos.

En el histograma del sensor 3 (el más alejado de la fuente), existe una región ancha entre 230 y $250\ \mu\text{s}$ donde se da una concentración importante y se corresponde con un área del aislante que se encuentra entre electrodos, al igual que ocurría con el sensor 1.

La retroproyección asociada a los histogramas se construye calculando la matriz de eventos de los tres sensores de forma simultánea. Como la velocidad de propagación es

CAPÍTULO 6: Monitorización de la actividad de descargas parciales en la plataforma de ensayos

desconocida al no disponer de los medios adecuados para calcularla de forma calibrada, se utiliza la velocidad de la Tabla 10 para construir las matrices de eventos.

Al calcular la matriz de eventos, se encuentra que no existe un punto coincidente; aun así, existe una región claramente delimitada entre $x \in (150, 180)$ mm, $y \approx 120$ mm y $z = 140$ mm donde se concentra la mayor cantidad de eventos lo cual, da certeza de la existencia de DP entre los electrodos bajo estudio.

Asumiendo que la no coincidencia de eventos se debe al error en la aplicación de la velocidad del sonido, se calculan diferentes matrices de eventos buscando la región donde las superficies de máxima concentración de eventos para cada sensor coinciden.

De este modo obtenemos como resultado:

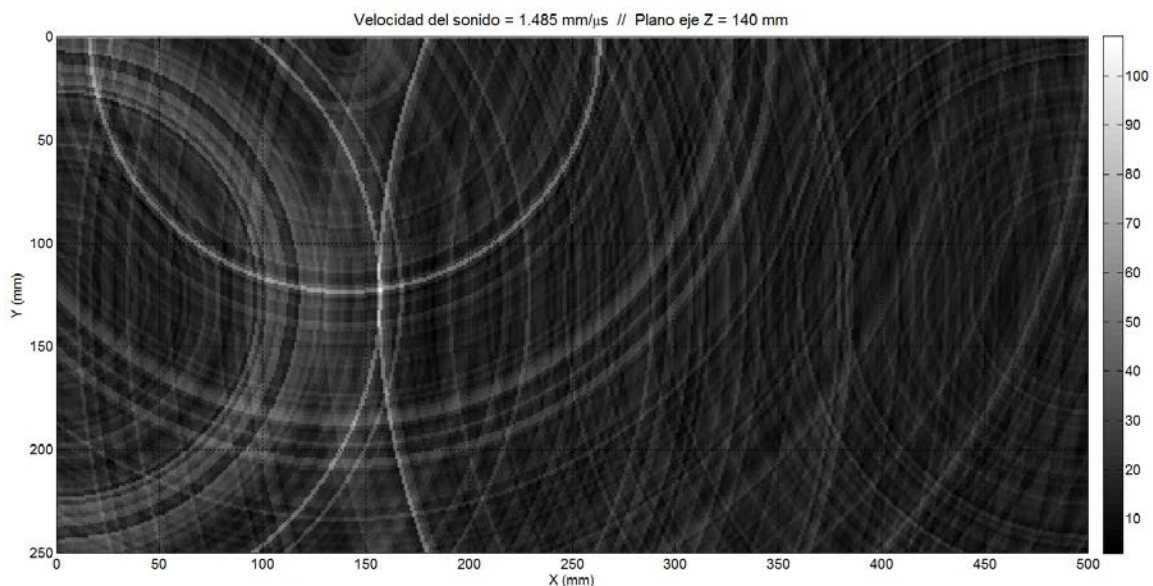


Figura 77. Retroproyección 2D de la matriz de eventos de la detección de DP internas para $z = 140$ mm y $v_{sonido} = 1.478$ mm/μs.

Ajustando la velocidad del sonido a $v_{sonido} = 1.478$ mm/μs, se obtiene que la matriz de eventos tiene una región donde se concentra la mayor cantidad de eventos en la posición $P(x, y, z) = (157, 123, 140)$ con una incidencia de 108 eventos; que prácticamente se corresponde a la suma de las incidencias máximas de los sensores 1, 2 y 3 (37, 35 y 37 respectivamente).

6.3 Detección y localización de descargas parciales superficiales

6.3 Detección y localización de descargas parciales superficiales

Debido al elevado nivel de señal de las DP y a la repetitividad de las mismas, para analizar el estado del aislante se han adquirido 55 medidas con una duración de 20 ms a 100 MSps en cada uno de los cuatro canales de forma simultánea.

La pre-configuración del filtro wavelet es como en el anterior caso: wavelet madre *Daubechies20* y máximo nivel descomposición de orden 20.

6.3.1 Selección del evento patrón

De las 55 medidas se selecciona el siguiente evento, debido a sus niveles de señal y coherencia de tiempos:

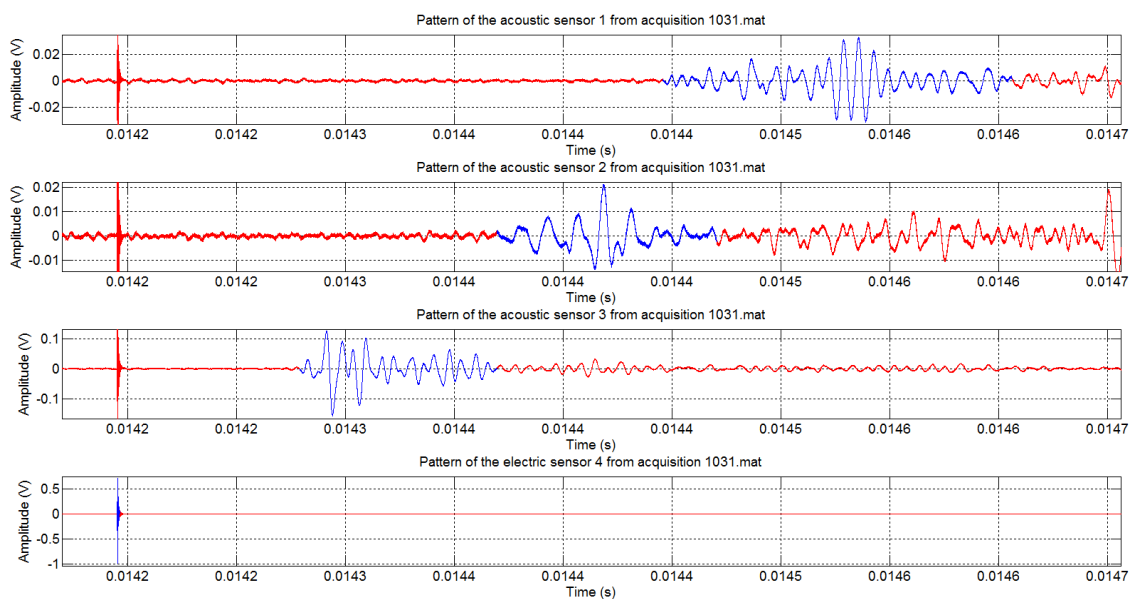


Figura 78. Evento patrón de descarga parcial interna.

El evento patrón es acondicionado y parametrizado para cada uno de los canales con el objeto de poder compararlo con las señales DP que se detecten posteriormente:

Nombre del fichero patrón	1031001	1031002	1031003	1031004
Señal de origen	1031	1031	1031	1031
Canal del patrón	1	2	3	4
Acústico = 1 // Eléctrico = 0	1	1	1	0
PMCC entre el patrón filtrado y sin filtrar	0.94	1	1	1
Amplitud patrón (mV)	64.2	34.3	215.6	1295.8
Energía patrón (u.a.)	1075,9	519,5	4103,5	1883,7
Ordenes filtro wavelet	9	10, 9	9, 10, 8	2
Frecuencia central patrón (KHz)	158,7	79,3	158,7	10949,8
Potencia en la Fc (dBm)	-18,10	-18,85	-2,27	-10,80
Índice de inicio patrón	1444570	1436958	1427903	1419525
Índice de fin patrón	1460622	1447046	1436955	1419641
Duración (microsegundos)	160,52	100,88	90,52	1,16
Instante inicio patrón (microsegundos)	14446	14370	14279	14195
Retardo (microsegundos)	251	195	84	0
Distancia estimada DP (mm)	346,38	269,10	115,92	-
'X sensor pos (mm)'	0	140	500	-
'Y sensor pos (mm)'	125	0	125	-
'Z sensor pos (mm)'	130	135	150	-

Tabla 8. Datos extraídos del evento patrón DP superficiales

En la Tabla 8 están parametrizados los datos del evento patrón y sus señales DP asociadas a cada canal. Es interesante destacar que la señal observada por el sensor 3 es de mayor amplitud que las de los sensores 1 y 2. De este dato se extrae que esta descarga ha tenido que ser generada en el extremo del electrodo más cercano al sensor 3 (datos que corroboran los retardos) y que, además, la atenuación por propagación en el aceite es menor que la propagación a través del papel entre electrodos.

Nuevamente, la aparición de descomposiciones en los sensores acústicos de orden 10, revelan la existencia de ondas transversales propagadas por la pared en los sensores.

6.3.2 Análisis de las medidas

En este experimento se han analizado 105 medidas con el evento DP seleccionado, y se han detectado los pares electro-acústicos por cada canal acústico utilizando sus respectivos patrones forma de onda. Al aplicar el algoritmo se obtuvo que se encontraran el siguiente número de señales:

Canal acústico	Número de eventos detectados	Número de pares obtenidos
1	221	641
2	416	1660
3	221	714

Tabla 9. Número de señales DP superficiales detectadas

Para realizar los histogramas que se presentan en la Fig. 79 se ha optado nuevamente por tomar pasos de 2 mm, como en las DP internas. Lo primero que se observa en dichos histogramas es que las DP se encuentran muy localizadas y concentradas, ya que la región donde se generan las DP es en torno a una punta. La retroproyección se corresponde a una extrapolación 2D en un corte en el plano $z = 130$ mm (altura donde se encuentra la unión de los electrodos).

Para el sensor 1 (Fig. 79 superior izquierda), prácticamente todos los eventos que se han detectado se concentran en 247 μ s, esto se debe a que, por configuración del espécimen, las DP se generan en torno a la punta.

Para el sensor 2 (Fig. 79 superior derecha), las DP detectadas son menos numerosas. Esto se puede deber a la directividad del sensor acústico y a la reflexión interna de la señal acústica al llegar a la frontera entre el aceite y la pared de PMMA.

En el histograma del sensor 3 (Fig. 79 inferior izquierda) que es el más cercano a la fuente, el histograma se concentra completamente en torno a 80 μ s, evidenciando que, por cercanía y ausencia de obstáculos, es el que mejor detecta de los tres sensores.

CAPÍTULO 6: Monitorización de la actividad de descargas parciales en la plataforma de ensayos

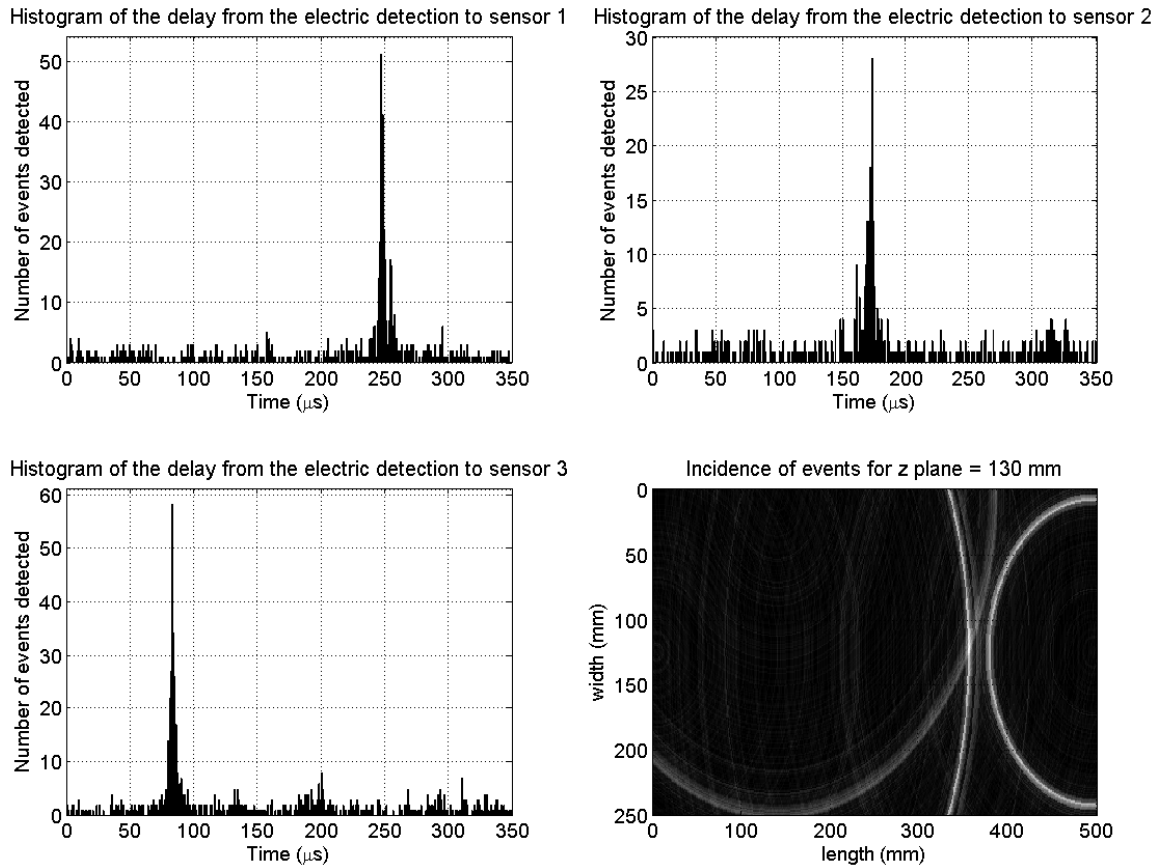


Figura 79. Histograma de los 3 sensores acústicos y su retroproyección asociada a la altura de la región donde se generan las DP ($z = 130\text{mm}$).

En la gráfica de la incidencia de eventos (Fig. 79 inferior derecha) se ha representado la retroproyección a 130 mm de la matriz conjunta de eventos (que es donde las líneas de máxima densidad de eventos están más próximas entre sí) y se observa que los eventos tienden a confluir en una región. Al igual que en las DP internas, se asume que la no coincidencia de eventos se debe al error en la aplicación de la velocidad del sonido. Se corrige la velocidad y se encuentra que los máximos para cada sensor coinciden cuando $v_{\text{sonido}} = 1.519 \text{ mm}/\mu\text{s}$.

De este modo obtenemos como resultado la Fig. 80 que se muestra a continuación:

6.3 Detección y localización de descargas parciales superficiales

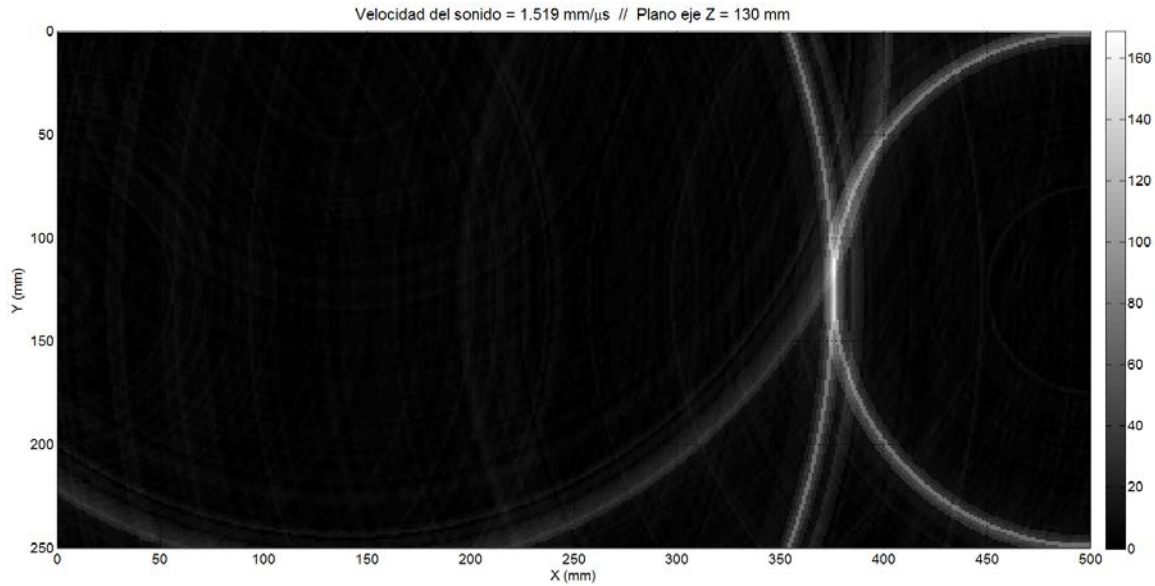


Figura 80. Retroproyección 2D de la matriz de eventos de la detección de DP superficiales para $z = 130 \text{ mm}$ y $v_{\text{sonido}} = 1.519 \text{ mm}/\mu\text{s}$.

Se ha encontrado que existe una concentración elevada de eventos (169) en la región del máximo para los siguientes cuatro puntos en el espacio: $P_1 = (374, 111, 130)$, $P_2 = (374, 112, 130)$, $P_3 = (374, 113, 130)$ y $P_4 = (374, 111, 130)$. Es interesante reseñar que los 169 eventos ubicados en estos puntos se corresponden exactamente con la suma del máximo de eventos para cada uno de los canales: 69 eventos, 29 eventos y 71 eventos para los canales 1,2 y 3 respectivamente.

Para observar con mayor claridad la concentración de eventos (Fig. 80), se realiza una representación 3D de los resultados obtenidos (Fig. 81), donde la concentración de eventos se visualiza como un valor en el eje Z. Gracias a ello, se pueden apreciar con mayor claridad cada uno de los frentes asociado a cada uno de los canales acústicos, y además aparece un máximo en la confluencia de los tres que se corresponde con la región donde se generan las DP.

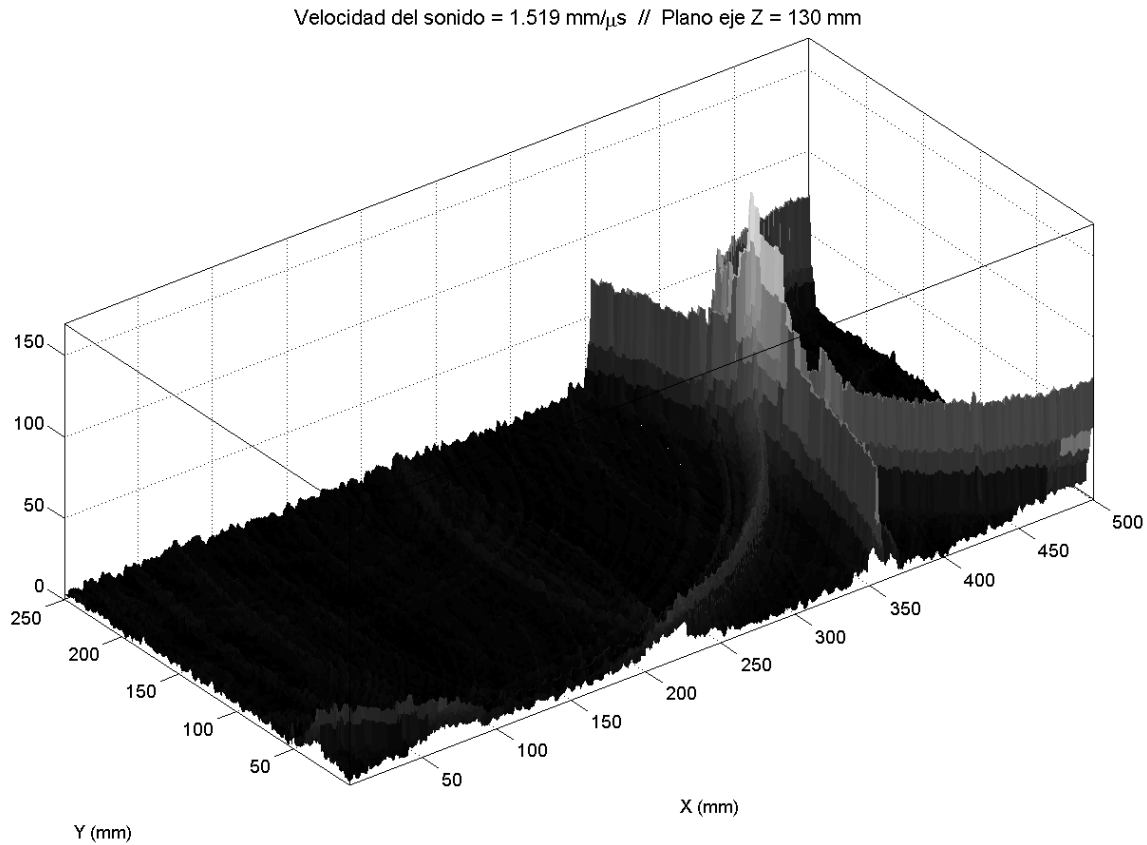


Figura 81. Retroproyección 3D de la matriz de eventos de la detección de DP superficiales para $z = 130$ mm y $v_{sonido} = 1.519$ mm/ μ s.

6.4 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una demostración de la utilidad de la matriz de eventos a la hora de buscar regiones dentro de la cuba con una alta probabilidad de generar DP.

En la medida de DP internas se ha observado que la región dentro de la cuba donde aparecen DP con mayor probabilidad es más dispersa; esto se debe a que el algoritmo no filtra los histogramas, sino que representa todos los posibles pares. Aun así, los tres histogramas, muestran máximos en ventanas temporales concretas. Cuando se construye la matriz de eventos asociada a los tres sensores acústicos con referencia eléctrica, aparece que en la región donde se encuentra el papel entre electrodos hay una actividad más elevada que en el resto de la cuba. Además, existe un punto donde hay una mayor concentración de eventos lo cual es muy probable que se corresponda con una zona

dañada con efecto memoria y susceptible de provocar un cortocircuito en un plazo de tiempo corto.

En cuanto a las medidas de DP superficiales, se ha encontrado que la actividad de DP se detecta con facilidad (la emisión acústica no está confinada y tiene niveles de emisión altos). Además, la actividad se encuentra confinada en una región concreta del espacio muy cerca de la punta, lo cual es coherente con la respuesta esperada. Es interesante comentar, que en estas medidas las señales están muy distorsionadas como se puede observar en las formas de onda y en las descomposiciones wavelet escogidas por el algoritmo. En un futuro se espera profundizar más en el diseño de un filtro wavelet específico para las señales directas emitidas por las DP, estudiando la posibilidad de eliminar la distorsión generada por las ondas transversales.

Las matrices de eventos han demostrado ser una herramienta útil para dar información sobre la probabilidad de que se generen DP en regiones concretas de la cuba. Es importante comentar, que esta manera de analizar las señales no es tanto una nueva forma de procesamiento, sino una forma distinta de observar el problema. En lugar de informar de dónde se ha generado un conjunto de DP, se da información sobre las regiones más probables de que aparezcan las DP; al tratarse de una información estadística, con una mayor población de señales detectadas aumenta la confianza en el resultado de la medida. A este fin puede contribuir de forma acumulativa cada nueva observación y cada sensor adicional.

Otra ventaja de la matriz de eventos, es que no necesita una medida sincronizada de todos los canales a la vez, ni tan siquiera requiere de referencia eléctrica. Basta con que haya tres parejas de sensores detectando sincronizados entre ellos; al sumar la matriz de eventos de cada uno de los pares se podrá obtener la probabilidad de que se generen DP en un punto concreto de la cuba (aunque no hayan medido las mismas DP).

De la experiencia obtenida en este trabajo, la localización por sí misma no basta para conocer el alcance del daño en el sistema aislante; es necesaria alguna forma de identificación para saber si el daño es confinado o no. Ahora bien, la forma de identificar el daño puede incorporar información alternativa a la estrictamente eléctrica: se puede identificar conociendo la estructura interna de la cuba y la localización del daño, o por concentración de la actividad. Como hemos visto, las DP superficiales tienen una actividad muy concentrada y poco dispersa, mientras que la actividad de DP internas está más deslocalizada.

CAPÍTULO 6: Monitorización de la actividad de descargas parciales en la plataforma de ensayos

Por último, la detección electro-acústica resulta interesante a nivel experimental ya que permite integrar lo mejor de cada técnica. Por un lado, la señal eléctrica nos permite identificar el tipo de señal que se está generando (en este trabajo se ha hecho gracias al filtro wavelet específico); además, al ser una referencia de tiempos cero, los histogramas se convierten en superficies esféricas (lo cual simplifica las ecuaciones de conversión).

La señal acústica, por otro lado, permite localizar las DP y además no se ve afectada por el ruido eléctrico ya que está mayoritariamente fuera de la banda de detección acústica.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras de investigación

7.1 Conclusiones

Esta tesis estudia la posibilidad de utilizar la medida acústica de DP, como elemento de monitorización del envejecimiento de sistemas aislantes papel-aceite. Por un lado, propone utilizar un sensor eléctrico que aporta el instante de generación de la DP (referencia de tiempo cero), y además es capaz de proporcionar información sobre el tipo de DP generada. Por otro lado, para la localización de DP propone utilizar el tiempo de vuelo de las señales acústicas detectadas por un conjunto de al menos tres sensores de ultrasonidos (PZT externos) respecto de la referencia eléctrica.

Para estudiar la viabilidad de la detección electro-acústica como sistema de control del envejecimiento, se han planteado los siguientes hitos:

CAPÍTULO 7: Conclusiones y líneas futuras de investigación

- Conocer las DP, sus emisiones y sus efectos en el aislante
- Estudiar técnicas que faciliten la detección, identificación y localización acústica en entornos complejos y caracterizarlas mediante simulación
- Desarrollar un algoritmo implementado en Matlab[®] que permite asociar la medida acústica de DP a regiones con fallos en el aislante
- Estudiar en un entorno experimental la viabilidad del algoritmo presentado como parte de un sistema de mantenimiento predictivo

Con el objetivo de conocer las DP, sus emisiones y sus efectos en el aislante, se creó una plataforma de ensayos. La plataforma permite controlar la magnitud de las DP y su actividad sin que pierdan su característica estocástica. Además, permite controlar el tipo de DP generada: superficial o interna. Aunque la plataforma está diseñada para medir las emisiones acústicas desde el exterior y las señales eléctricas en HF, también permite el uso de sensores de otro tipo, como los acústicos internos de fibra óptica o los sensores electromagnéticos UHF. Adicionalmente, la plataforma cuenta con un sistema comercial de identificación de DP, *PDcheck*, que da garantía de la medida de DP y su tipo. El sistema de adquisición elegido es modular y sincronizado, muestreando hasta 100 MSps en registros de hasta 20 ms con cuatro canales simultáneos.

Las primeras medidas en la plataforma han servido para conocer las características de las emisiones acústicas, así como, el alcance de los daños que provocan en el aislante. Las DP superficiales tienen niveles de emisión altos, se ven menos afectadas por la atenuación al propagarse y sus emisiones están muy localizadas; sin embargo, se ven más afectadas por señales secundarias, como los rebotes y la propagación por la pared, debido a que sufren poca atenuación. Por el contrario, las DP internas tienen niveles de emisión bajos; al estar confinadas, la atenuación por propagación es elevada y su actividad suele estar dispersa en toda la posible región de generación, salvo cuando aparece una zona dañada con efecto memoria; se ven poco afectadas por señales secundarias como los rebotes y la transmisión por la pared, ya que están confinadas y sufren una atenuación alta. En cuanto al daño, independientemente de la magnitud y la concentración, el mayor peligro proviene de daños internos confinados; en ese caso se genera un efecto memoria en una zona no regenerable, que puede provocar cortocircuitos en el sistema eléctrico y combustión del elemento aislante, con el peligro que ello conlleva.

Para hacer una correcta valoración del daño en el papel es necesario conocer simultáneamente el tipo de DP generada y su localización. En este sentido, la detección

electro-acústica se ajusta al problema, ya que la medida eléctrica permite identificar y la medida acústica permite localizar. Se han identificado eventos patrón repetitivos; esto es, un conjunto de señales detectadas (una por sensor) que cumplen con la ligadura de tiempos para una emisión producida por los especímenes de ensayo. Sin embargo, aunque los canales acústicos detecten la misma DP, la forma de onda registrada difiere de un canal acústico a otro debido a la distorsión introducida por las emisiones secundarias que tienen distintos caminos de propagación en cada canal.

Se ha implementado un filtro wavelet específico con el objeto de identificar DP a partir de sus transitorios eléctricos, así como para estudiar cómo se distorsiona la medida acústica por las ondas acústicas secundarias. Este filtro wavelet específico es autoconfigurable a partir de una forma de onda dada y de un criterio de valoración. Para ello se evalúan simultáneamente la energía y la forma de onda, lo que evita detectar como válidas, tanto señales ruidosas de gran amplitud, pero con poco parecido con la señal patrón, como señales con un mayor parecido que otras, pero de pequeña intensidad comparable con el ruido.

Mediante simulación se han comparado tres técnicas orientadas a la localización: detección de máximo de la señal, mínimo de la energía y correlación cruzada. La simulación parte de una serie temporal construida sintéticamente, a la que se le añade un conjunto de señales DP con retardos aleatorios, ruido blanco y ruido monocromático (asociados a fuentes de ruido propias de un transformador en funcionamiento). Como conclusión se ha adoptado un procesamiento fuera de línea y un algoritmo de detección e identificación formado por un filtro wavelet específico y la correlación cruzada.

La matriz de eventos supone un cambio en la observación del problema: en lugar de interpretar eventos de DP detectados individualmente, se define la probabilidad de encontrar actividad de DP en una región dentro de la cuba. Cada matriz de eventos se construye a partir del histograma de retardos entre dos sensores, que se traslada a un mapa espacial de superficies con información de persistencia de la actividad. Las parejas de sensores pueden ser dos sensores acústicos o un sensor acústico y otro eléctrico. En el caso de un sensor acústico con referencia eléctrica el problema se simplifica, ya que las superficies adquieren la estructura de circunferencias concéntricas debido a que la medida eléctrica es instantánea. El sistema es escalable de forma sencilla en número de sensores y no es necesario que todos estén detectando la misma DP sincronizadamente y al mismo tiempo.

Los resultados con el sistema de monitorización se realizaron sobre la plataforma de ensayos configurada para albergar simultáneamente dos especímenes de generación: uno de DP internas y otro de DP superficiales. En la monitorización de DP internas la actividad de DP entre los electrodos es más elevada que en el resto. Aunque la actividad es en una región dispersa, dentro de la misma se identifica un punto con mayor concentración de eventos interpretado como la zona dañada en el papel aislante con efecto memoria. En la monitorización de DP superficiales la actividad está concentrada en una región concreta cerca de la punta.

Como conclusión final, se ha desarrollado un sistema de detección, localización e identificación de daños en los sistemas aislantes papel-aceite a partir de la detección electro-acústica de DP. A pesar de que el sistema de adquisición presentado tiene la configuración más simple (un sensor eléctrico de referencia más tres acústicos montados en las paredes de la cuba), el algoritmo desarrollado caracteriza la actividad esperada tanto de DP internas como de DP superficiales.

Además, el algoritmo está preparado para caracterizar DP utilizando sensores de otro tipo, como pueden ser los sensores acústicos internos de fibra óptica, y es escalable a un mayor número de sensores que realicen la medida simultáneamente.

El algoritmo aprovecha la potencia de un filtro wavelet específico que selecciona las componentes más significativas a partir de la forma de onda asociada a una señal DP. Adicionalmente, dichas componentes pueden ser utilizadas para identificar el tipo de señal o señales que componen la adquisición.

Por último, la plataforma de ensayos que se ha diseñado y que ha sido instalada en el LINEALT ha permitido estudiar simultáneamente las características eléctricas y acústicas de las DP generadas, facilitando la configuración del algoritmo para su implementación como base de la medida de DP en otros escenarios.

7.2 Líneas futuras

El objetivo final de la línea de investigación abierta con la presente tesis es desarrollar un sistema de mantenimiento predictivo para transformadores a partir de la medida acústica de DP. Para conseguir este ambicioso objetivo es necesario profundizar en diferentes aspectos, de los cuales se hace un esbozo a continuación.

En cuanto a la plataforma de ensayos, el siguiente paso sería la realización sistemática de medidas acústicas en transformadores para completar un registro del conjunto de señales que se miden en campo [17]. Ahora bien, tanto la medida eléctrica como la medida acústica con sensores externos son difíciles de realizar sobre transformadores en activo. Por ello, los nuevos sensores de fibra óptica montados en el interior [52], suponen una alternativa atractiva frente a las técnicas convencionales [16].

Referido a los sistemas de instrumentación, en este trabajo se ha presentado un sistema de cuatro canales escalable. Cabe extenderlo para explorar sistemas de medida más complejos, con ocho sensores acústicos o más [71], integrando bloques de procesamiento hardware sobre FPGA (*Field Programmable Gate Array*) que permitan realizar en tiempo real algunas técnicas de procesamiento más pesadas, como las correlaciones cruzadas.

Uno de los escenarios presentados en este trabajo es la presencia de dos fuentes distintas emitiendo de forma simultánea. En este sentido, existen otros trabajos de investigación en detección multi-fuente en los cuales se busca identificar y separar dichas emisiones para facilitar la detección [86].

Otra cuestión que ha aparecido durante las medidas experimentales es cómo seleccionar en cada sensor la señal asociada a una misma DP cuando existen varias señales posibles que temporalmente son coherentes. En este trabajo, el criterio de selección permite discriminar señales secundarias, pero existen técnicas estadísticas más sofisticadas mediante la identificación de retardos inválidos [87].

Siguiendo con la línea del procesamiento, el punto que más interés despierta es la identificación del tipo de DP. Este es fundamental para comprender el alcance del daño que está sufriendo el aislante, por lo cual se han explorado todo tipo de técnicas basadas en redes neuronales y conocimiento experto. En ese sentido hay que destacar las investigaciones de Woon [88] y de Boczar [63, 89, 90].

CAPÍTULO 7: Conclusiones y líneas futuras de investigación

Por último, conviene destacar otra de las líneas presentadas en este trabajo, referida al enfoque estadístico de la localización. Hay diferentes escenarios en los que no es posible sincronizar a una señal para localizar con un array de sensores. Sin embargo, si existe un número suficiente de medidas, se puede calcular en qué regiones hay mayor probabilidad de encontrar una DP que en el resto. Esta línea de investigación ha sido desarrollada y expandida en otros trabajos tanto en la medida acústica [71], como en medidas con UHF [91].

7.3 Publicaciones asociadas a la tesis

Cuerpo de la tesis

Revistas

- **J. Rubio-Serrano**, M. V. Rojas-Moreno, J. Posada, J. M. Martinez-Tarifa, G. Robles, and J. A. Garcia-Souto, "*Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems,*" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, pp. 1569-1578, 2012

Capítulos de libro

- **J. Rubio-Serrano**, J. E. Posada, and J. A. Garcia-Souto, "Detection and Location of Acoustic and Electric Signals from Partial Discharges with an Adaptative Wavelet-Filter Denoising," in *Electrical Engineering and Applied Computing*. vol. 90, S.-I. Ao and L. Gelman, Eds., ed: Springer Netherlands, 2011, pp. 25-38.

Congresos internacionales

- **J. Rubio-Serrano**, J. Posada, I. Bua, and J. A. Garcia-Souto, "Comparison of processing techniques for optimizing the diagnosis of solid insulation based on acoustic emissions from partial discharges," in *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, 2013, pp. 129-132.
- **J. Rubio-Serrano**, J. A. Garcia-Souto, and J. E. Posada, "Instrumentation system and digital signal processing for studying the characteristics of the acoustic and electrical signals generated by partial discharges," in *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2012, pp. 573-578.

- A. Cavallini, C. G. A. Ramos, G. C. Montanari, **J. Rubio-Serrano**, and J. A. Garcia-Souto, "Comparison of ultrasonic, electrical and UHF characteristics of partial discharge emission in oil/paper insulation systems," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2011 Annual Report Conference on, 2011, pp. 440-443.
- **J. Rubio-Serrano**, J. E. Posada, and J. A. Garcia-Souto, "Digital Signal Processing for the Detection and Location of Acoustic and Electric Signals from Partial Discharges," *World Congress on Engineering 2010, London UK*, vol. II, pp. 967-972, 2010.

Congresos nacionales

- **J. Rubio Serrano**, J. E. Posada, and J. A. Garcia Souto, "Procesamiento para detección, identificación y localización de señales acústicas y eléctricas provenientes de descargas parciales.," in *SAAEI, Badajoz*, 2011, pp. 339-344.
- **J. Rubio Serrano**, P. Grandas Aguado, J. E. Posada, and J. A. Garcia Souto, "Instrumentación para el Diagnóstico de Sistemas Aislantes en Aceite mediante la Detección Acústica de Descargas Parciales.," in *SAAEI, Guimaraes*, 2012.

Dirección Proyectos Fin de Carrera

- Alumno: P. Grandas Aguado; Directores: J. A. García Souto, **J. Rubio Serrano**, Título: "Interfaz gráfica en Matlab para el análisis de descargas parciales en detección eléctrica y acústica." Proyecto Fin de Carrera en Ingeniería Técnica Industrial (Electrónica Industrial), 2011, Universidad Carlos III Leganés

Otras publicaciones relacionadas

Revistas

- I. Bua-Nunez, J. E. Posada-Roman, **J. Rubio-Serrano**, and J. A. Garcia-Souto, "Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, pp. 1002-1013, 2014.

- 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, pp. 4793-4802, Apr 2012.

Congresos internacionales

- C. Boya, J. E. Posada, **J. Rubio-Serrano**, J. A. García-Souto, and M. Ruiz-Llata, "Instrumentation system for acoustic detection of multiple sources of partial discharges," in *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2012, pp. 579-584.

Glosario

CBM	<i>Condition Based Monitoring</i>
DGA	<i>Dissolved Gas Analysis</i>
DIAMAT	<i>Grupo de Diagnóstico de Máquinas Eléctricas</i>
DP	<i>Descarga Parcial</i>
EA	<i>Emisión acústica</i>
EMC	<i>ElectroMagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>ElectroMagnetic Interference</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FO	<i>Fibra Óptica</i>
FWE	<i>Filtro Wavelet Específico</i>
FWU	<i>Filtro Wavelet Universal</i>
GOTL	<i>Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HFCT	<i>High Frequency Current Transformer</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LINEALT	<i>Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión</i>
OLTC	<i>On Load Tap Changer</i>
PD	<i>Partial Discharge</i>
PDEV	<i>Partial Discharge Extinction Voltage</i>
PDIV	<i>Partial Discharge Inception Voltage</i>
PMCC	<i>Pearson's Product-Moment Cross-Correlation</i>
PRPD	<i>Phase Resolved Partial Discharge</i>
PZT	<i>Piezo-Electric Transducer</i>
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

Referencias

REFERENCIAS

- [1] H. L. Willis, G. V. Welch, and R. R. Schrieber, *Aging power delivery infrastructures*: M. Dekker, 2001.
- [2] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, pp. 12-25, Nov-Dec 2002.
- [3] T. Leibfried, "Online monitors keep transformers in service," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 11, pp. 36-42, Jul 1998.
- [4] R. Bartnikas, "Partial discharges - Their mechanism, detection and measurement," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, pp. 763-808, 2002.
- [5] "IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.," *IEC (International Electrotechnical Commission)*, 2000.
- [6] "IEC TS 62478: High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods," *IEC (International Electrotechnical Commission)*, 2016.
- [7] "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers," *IEEE Std C57.104-2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991)*, pp. C1-27, 2009.
- [8] R. J. Vanbrunt, "Stochastic Properties of Partial-Discharge Phenomena," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, pp. 902-948, 1991.
- [9] A. Santosh Kumar, R. P. Gupta, K. Udayakumar, and A. Venkatasami, "Online partial discharge detection and location techniques for condition monitoring of power transformers: a review," *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 927-31, 2008.
- [10] A. J. Vandermaar, "Condition Assessment of Power Transformers," *2008 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vols 1-11*, pp. 3028-3032, 2008.
- [11] M. Hikita, S. Okabe, H. Murase, and H. Okubo, "Cross-equipment evaluation of partial discharge measurement and diagnosis techniques in electric power apparatus for transmission and distribution," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, pp. 505-518, 2008.
- [12] A. Krivda, "Automated recognition of partial discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, pp. 796-821, 1995.

- [13] N. C. Sahoo, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, "Trends in partial discharge pattern classification: a survey," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, pp. 248-264, 2005.
- [14] A. Cavallini, G. C. Montanari, A. Contin, and F. Puletti, "A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, pp. 23-30, Mar-Apr 2003.
- [15] P. M. Eleftherion, "Partial Discharge XXI. Acoustic Emission-Based PD Source Location in Transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 11, pp. 22-26, 1995.
- [16] "IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions From Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors," *IEEE Std C57.127-2007 (Revision of IEEE Std C57.127-2000)*, pp. c1-47, 2007.
- [17] J. Ramirez-Nino and A. Pascacio, "Acoustic measuring of partial discharge in power transformers," *Measurement Science & Technology*, vol. 20, 2009.
- [18] J. G. Anderson, "Ultrasonic Detection and Location of Electric Discharges in Insulating Structures," *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 75, pp. 1193-1198, 1956.
- [19] E. Howells and E. T. Norton, "Location of partial discharges sites in online transformers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, pp. 158-162, 1981.
- [20] E. Howells and E. T. Norton, "Detection of partial discharges in transformers using acoustic emission techniques," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 97, pp. 1538-1549, 1978.
- [21] L. E. Lundgaard, "Partial discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations," *IEEE Electrical Insulation Magazine*|*IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 8, p. 10.1109/57.145095, 1992.
- [22] L. E. Lundgaard, "Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application," *IEEE Electrical Insulation Magazine*|*IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 8, p. 10.1109/57.156943, 1992.
- [23] P. M. Eleftherion, "Partial discharge detection and source location in production and in-service high voltage transformers using acoustic emission," *Nondestructive Evaluation of Aging Utilities*, vol. 2454, pp. 256-267, 1995.

- [24] J. Rubio-Serrano, J. E. Posada, and J. A. Garcia-Souto, "Digital Signal Processing for the Detection and Location of Acoustic and Electric Signals from Partial Discharges," *World Congress on Engineering 2010, London UK*, vol. II, pp. 967-972, 2010.
- [25] P. Kundu, N. K. Kishore, and A. K. Sinha, "Identification and Localization of Multi-source Partial Discharges by Acoustic Measurements in Oil-pressboard Insulation System," *2008 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 35-38, 2008.
- [26] L. J. Tang, R. C. 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, pp. 492-495, Apr 2008.
- [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, pp. 1576-1583, 2008.
- [28] R. Meunier and G. H. Vaillancourt, "Propagation behaviour of acoustic partial discharge signals in oil-filled transformers," *ICDL 1996 - 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, pp. 401-404, 1996.
- [29] D. J. Kweon, S. B. Chin, H. R. Kwak, J. C. Kim, and K. B. Song, "The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1976-1983, 2005.
- [30] R. T. Harrold, "Acoustic waveguides for sensing and locating electrical discharges in high-voltage power transformers and other apparatus," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 98, pp. 449-457, 1979.
- [31] X. Wang, B. Li, H. T. Roman, O. L. Russo, K. Chin, and K. R. Farmer, "Acousto-optical PD detection for transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 1068-1073, 2006.
- [32] S. E. U. Lima, O. Frazao, R. G. Farias, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, *et al.*, "Mandrel-Based Fiber-Optic Sensors for Acoustic Detection of Partial Discharges," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2526-2534, 2010.

- [33] D. Wotzka, "Mathematical description of acoustic emission signals generated by partial discharges," in *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2012* 2012, pp. 617-620.
- [34] A. O. Akumu, H. Masai, F. Adachi, R. Ozaki, H. Ihori, M. Fujii, *et al.*, "Analysis of partial discharge acoustic wave propagation in a model transformer," *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, vol. 42, pp. 3686-3689, 2003.
- [35] S. Theodoridis and K. Koutroumbas, Eds., *Pattern Recognition & Matlab Intro: Pattern Recognition*. Academic Press, 2008, p.^pp. Pages.
- [36] T. Boczar, S. Borucki, and A. Cichon, "Parameters of Acoustic Emission Signals Constituting the Knowledge Base of a Computer Diagnostic System of Power Transformer Insulation Systems," *2009 2nd International Students Conference on Electrodynamics and Mechatronics*, pp. 5-6, 2009.
- [37] T. Boczar, S. Borucki, and A. Cichon, "Application of a neural classifier in an expert system for the evaluation of the condition of power transformer insulation system," *Pomiary Automatyka Kontrola*, pp. 29-32, 2007.
- [38] T. Boczar, S. Borucki, A. Cichon, M. Lorenc, and D. Zmarzly, "The possibilities of using the acoustic emission method in expert systems for the evaluation of insulation systems of power transformers," *Journal De Physique Iv*, vol. 137, pp. 51-56, 2006.
- [39] R. M. Sharkawy, T. K. Abdel-Galil, R. S. Mangoubi, M. M. Salama, and R. Bartnikas, "Particle Identification in Terms of Acoustic Partial Discharge Measurements in Transformer Oils," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, pp. 1649-1656, Dec 2008.
- [40] C. Boya, J. E. Posada, J. Rubio-Serrano, J. A. García-Souto, and M. Ruiz-Llata, "Instrumentation system for acoustic detection of multiple sources of partial discharges," in *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2012, pp. 579-584.
- [41] S. M. Markalous and K. Feser, "All-acoustic PD measurements of oil/paper-insulated transformers for PD-localization," *APTADM'2004. Second International Conference on Advances in Processing Testing and Application of Dielectric Materials*, pp. 106-112, 2004.

- [42] M. M. de A. Olivieri, W. A. Mannheimer, and A. P. Ripper-Neto, "On the use of acoustic signals for detection and location of partial discharges in power transformers," *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075)*, p. 10.1109/ELINSL.2000.845502, 2000.
- [43] H. N. Nagamani, T. B. Shanker, V. Vaidhyathan, and S. Neelakantan, "Acoustic emission technique for detection and location of simulated defects in power transformers," in *2005 IEEE Russia Power Tech*, St. Petersburg, Russia, 2005, pp. 1-7.
- [44] C. Su-Yeon, P. Dae-Won, K. Il-Kwon, P. Chan-Yong, and K. Gyung-Suk, "Analysis of acoustic signals generated by partial discharges in insulation oil," *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 525-8, 2008.
- [45] R. T. Harrold, "Relationship Between Ultrasonic and Electrical Measurements of under-Oil Corona Sources," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 11, pp. 8-11, 1976.
- [46] A. Cavallini, C. G. A. Ramos, G. C. Montanari, J. Rubio-Serrano, and J. A. Garcia-Souto, "Comparison of ultrasonic, electrical and UHF characteristics of partial discharge emission in oil/paper insulation systems," in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011* 2011, pp. 440-443.
- [47] M. Abdel-Salam, *High-voltage engineering: theory and practice*: M. Dekker, 2000.
- [48] A. Cavallini, X. L. Chen, G. C. Montanari, and F. Ciani, "Diagnosis of EHV and HV Transformers Through an Innovative Partial-Discharge-Based Technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 814-824, Apr 2010.
- [49] G. S. Kil, I. K. Kim, D. W. Park, S. Y. Choi, and C. Y. Park, "Measurements and analysis of the acoustic signals produced by partial discharges in insulation oil," *Current Applied Physics*, vol. 9, pp. 296-300, 2008.
- [50] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, "Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, pp. 328-340, 2005.

- [51] A. Cavallini, G. C. Montanari, M. Tozzi, and X. Chen, "Diagnostic of HVDC systems using partial discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, pp. 275-284, 2011.
- [52] 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*, vol. 24, p. 094015, 2013.
- [53] "IEC 61181: Mineral oil-filled electrical equipment - Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment," *IEC (International Electrotechnical Commission)*, 2007.
- [54] D. Wotzka, T. Boczar, and D. Zmarzly, "Analysis of Acoustic Wave Propagation in a Power Transformer Model," *Acta Physica Polonica A*, vol. 116, pp. 428-431, 2009.
- [55] R. Ghosh, B. Chatterjee, and S. Dalai, "A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, pp. 237-245, 2017.
- [56] 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, pp. 4793-4802, Apr 2012.
- [57] R. Tobazeon, "Prebreakdown phenomena in dielectric liquids," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, pp. 1132-1147, 1994.
- [58] A. Krivda and S. Halen, "Recognition of PD patterns in generators," *Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vols 1 and 2*, pp. 206-211, 1997.
- [59] O. Perpiñán, M. A. Sánchez-Urán, F. Álvarez, J. Ortego, and F. Garnacho, "Signal analysis and feature generation for pattern identification of partial discharges in high-voltage equipment," *Electric Power Systems Research*, vol. 95, pp. 56-65, 2013/02/01/ 2013.

- [60] J. Rubio-Serrano, M. V. Rojas-Moreno, J. Posada, 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*, vol. 19, pp. 1569-1578, 2012.
- [61] J. A. Ardila-Rey, J. M. Martínez-Tarifa, G. Robles, and M. V. Rojas-Moreno, "Partial discharge and noise separation by means of spectral-power clustering techniques," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 1436-1443, 2013.
- [62] F. Alvarez, J. Ortego, F. Garnacho, and M. A. Sanchez-Uran, "A clustering technique for partial discharge and noise sources identification in power cables by means of waveform parameters," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, pp. 469-481, 2016.
- [63] T. Boczar, A. Cichon, and S. Borucki, "Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, pp. 854-865, 2014.
- [64] T. Boczar and D. Zmarzly, "Application of wavelet analysis to acoustic emission pulses generated by partial discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, pp. 433-449, 2004.
- [65] L. Hao, P. L. Lewin, J. A. Hunter, D. J. Swaffield, A. Contin, C. Walton, *et al.*, "Discrimination of multiple PD sources using wavelet decomposition and principal component analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, pp. 1702-1711, 2011.
- [66] H. d. O. Mota, L. C. D. d. Rocha, T. C. d. M. Salles, and F. H. Vasconcelos, "Partial discharge signal denoising with spatially adaptive wavelet thresholding and support vector machines," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 644-659, 2011/02/01/ 2011.
- [67] T. Boczar, S. Borucki, A. Cichon, and D. Zmarzly, "Application Possibilities of Artificial Neural Networks for Recognizing Partial Discharges Measured by the Acoustic Emission Method," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, pp. 214-223, 2009.

- [68] C. C. Kuo, "Artificial recognition system for defective types of transformers by acoustic emission," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 10304-10311, Sep 2009.
- [69] L. Hao and P. L. Lewin, "Partial discharge source discrimination using a support vector machine," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, pp. 189-197, 2010.
- [70] 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*, vol. 54, pp. 2258-2263, 2005.
- [71] I. Bua-Nunez, J. E. Posada-Roman, J. Rubio-Serrano, and J. A. Garcia-Souto, "Instrumentation System for Location of Partial Discharges Using Acoustic Detection With Piezoelectric Transducers and Optical Fiber Sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, pp. 1002-1013, 2014.
- [72] E. Howells and E. T. Norton, "Parameters Affecting the Velocity of Sound in Transformer Oil," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 103, pp. 1111-1115, 1984.
- [73] G. Robles, M. Sánchez-Fernández, R. A. 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*, vol. 62, pp. 932-941, 2013.
- [74] J. M. Martinez-Tarifa, G. Robles, M. V. Rojas-Moreno, and J. Sanz-Feito, "Partial discharge pulse shape recognition using an inductive loop sensor," *Measurement Science & Technology*, vol. 21, p. 105706, Oct 2010.
- [75] J. Rubio-Serrano, J. A. Garcia-Souto, and J. E. Posada, "Instrumentation system and digital signal processing for studying the characteristics of the acoustic and electrical signals generated by partial discharges," in *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2012, pp. 573-578.
- [76] P. vonGlahn, K. L. Stricklett, R. J. VanBrunt, and L. A. V. Cheim, "Correlations between electrical and acoustic detection of partial discharge in liquids and implications for continuous data recording," *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vols 1 and 2*, pp. 69-74, 1996.

- [77] M. Li, H. Zhao, and J. Zhang, "Fiber Fabry-Perot sensors based acoustic detection of partial discharges in power transformers," *ICPASM 2005: Proceedings of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vols 1 and 2*, pp. 254-257, 2006.
- [78] B. Yu, D. W. Kim, J. D. Deng, H. Xiao, and A. Wang, "Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers," *Applied Optics*, vol. 42, pp. 3241-3250, 2003.
- [79] L. Wang, N. Fang, C. Wu, H. Qin, and Z. Huang, "A Fiber Optic PD Sensor Using a Balanced Sagnac Interferometer and an EDFA-Based DOP Tunable Fiber Ring Laser," *Sensors*, vol. 14, p. 8398, 2014.
- [80] J. E. Posada, J. A. Garcia Souto, and J. Rubio Serrano, "Sistema de Instrumentación para la Detección y Localización de Descargas Parciales por medio de emisiones acústicas," in *SAAEI 2011*, Badajoz, 2011, pp. 379-384.
- [81] Y. W. Tang, C. C. Tai, C. C. Su, C. Y. Chen, and J. F. Chen, "A correlated empirical mode decomposition method for partial discharge signal denoising," *Measurement Science & Technology*, vol. 21, Aug 2010.
- [82] D. L. Donoho, "De-noising by soft-thresholding," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, pp. 613-627, 1995.
- [83] X. Ma, C. Zhou, and I. J. Kemp, "Automated wavelet selection and thresholding for PD detection," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, pp. 37-45, Mar-Apr 2002.
- [84] J. A. Li, T. Y. Jiang, S. Grzybowski, and C. K. Cheng, "Scale Dependent Wavelet Selection for De-noising Of Partial Discharge Detection," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, pp. 1705-1714, Dec 2010.
- [85] C. Macia-Sanahuja and H. Lamela-Rivera, "Wavelet analysis of partial discharges acoustic waves obtained using an optical fibre interferometric sensor for transformer applications," *2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vols 1 and 2*, pp. 1071-1076, 2003.
- [86] C. Boya, M. Ruiz-Llata, J. Posada, 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, pp. 1663-1673, 2015.

- [87] D. Antony and G. S. Punekar, "Identification of invalid time-delay-groups using discriminant and Jacobian-determinant in acoustic emission PD source localisation," *IET science, measurement & technology*, 2016.
- [88] W. L. Woon, A. El-Hag, and M. Harbaji, "Machine learning techniques for robust classification of partial discharges in oil-paper insulation systems," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 10, pp. 221-227, 2016.
- [89] T. Boczar, D. Zmarz, x, P. Fr, x, and cz, "Comparative studies of partial discharge using acoustic emission method and optical spectroscopy," in *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2015, pp. 740-743.
- [90] T. Boczar, A. Cichoń, D. Wotzka, M. Kunicki, and M. Koziol, "Indicator analysis of partial discharges measured using various methods in paper-oil insulation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, pp. 120-128, 2017.
- [91] M. X. Zhu, Y. B. Wang, Q. Liu, J. N. Zhang, J. B. Deng, G. J. Zhang, *et al.*, "Localization of multiple partial discharge sources in air-insulated substation using probability-based algorithm," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, pp. 157-166, 2017.
- [92] P. Grandas Aguado, *Interfaz gráfica en Matlab para el análisis de descargas parciales en detección eléctrica y acústica*: Universidad Carlos III de Madrid (Proyecto Fin de Carrera), 2011.
- [93] J. Rubio Serrano, P. Grandas Aguado, J. E. Posada, and J. A. Garcia Souto, "Instrumentación para el Diagnóstico de Sistemas Aislantes en Aceite mediante la Detección Acústica de Descargas Parciales," in *SAAEI*, Guimaraes, 2012.

Anexos

A.I Efectos de la propagación acústica en las fronteras de diferentes medios

Uno de los principales problemas asociados a la detección acústica de DP en sistemas aislantes papel-aceite, es que estos se encuentran confinados dentro de cubas metálicas como en el caso de los transformadores. Esto provoca que la señal acústica tenga que atravesar diferentes medios con propiedades acústicas como la velocidad de propagación o la impedancia acústica distintas. Esta diferencia de propiedades acústicas afecta de manera negativa a la transmitancia acústica o, dicho de otro modo, al porcentaje de energía de la señal incidente que se transmite de un medio a otro.

La energía de una onda acústica incidente que se transmite en la frontera de un medio a otro se descompone de la siguiente manera:

$$E_{transmitida} + E_{reflejada} = E_{incidente} \Rightarrow T + R = 1 \quad (10.1)$$

Donde T es el coeficiente de transmisión y representa el % de energía de la onda incidente transmitida al otro medio y R es el coeficiente de reflexión y representa el % de la energía incidente que es reflejada.

El coeficiente de transmisión a incidencia normal de una emisión acústica se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (10.2)$$

Donde Z_i es la impedancia acústica de cada medio, y se define como:

$$Z_i = \rho_i \cdot c_i \quad (10.3)$$

c_i es la velocidad de propagación en el medio y ρ_i es su densidad volumétrica. En la Tabla 10 se especifican las propiedades acústicas principales de los elementos que componen un transformador y la plataforma de ensayos.

Para medir la atenuación que sufre la onda incidente respecto de la onda transmitida se utiliza el decibelio referido a la medida a la salida del sensor dB:

$$dB = 10 \log \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} = 20 \log \frac{V_{transmitida}}{V_{incidente}} \quad (10.4)$$

donde V se corresponde con la medida de la presión expresada en voltios (V).

Propiedades acústicas de los materiales	Velocidad Longitudinal (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Impedancia acústica Z (kg/(s·m ²))
Acero dulce ⁽¹⁾ (Mild Steel)	5900	7800	46,02 · 10 ⁶
Acero inoxidable ⁽¹⁾ (Stainless Steel)	5790	7890	45,68 · 10 ⁶
Aceite de transformador ⁽¹⁾ (transformer oil)	1390	920	1,28 · 10 ⁶
Papel con aceite ⁽²⁾ (impregnated pressboard)	1250	1950	2,44 · 10 ⁶
Plexiglass ⁽¹⁾ (PMMA)	2760	1270	3,51 · 10 ⁶
Gel Acoplante ⁽¹⁾ (Glycerin)	1920	1260	2,42 · 10 ⁶
Aire ⁽²⁾	340	1,29	438,6

Tabla 10. Propiedades acústicas de los elementos de un transformador. Datos extraídos de

(¹) <https://www.nde-ed.org> y de (²) L. E. Lundgaard [21]

Si tenemos en cuenta los datos presentados en la tabla y la ecuación (10.2), la primera consecuencia importante que obtenemos, es la baja transmitancia que hay cuando la señal acústica pasa de cualquier medio al aire. Por ejemplo, si calculamos el caso más favorable que es cuánta señal acústica se transmite desde el aceite al aire obtenemos que sólo se transmite el 0,14 % o, lo que es lo mismo, se refleja el 99,86 % hacia el interior. Por tanto, para garantizar la correcta transmisión de la señal acústica al sensor habrá que evitar cualquier interfaz de aire rellenándolo con gel acoplante.

Por otro lado, también se puede calcular la intensidad transmitida a un sensor PZT externo fijado a una cuba de acero inoxidable, por una onda acústica propagándose por el aceite.

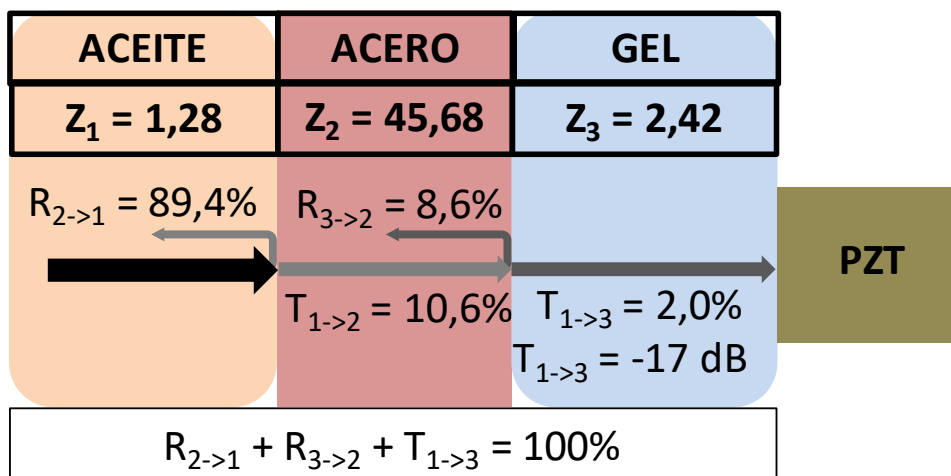


Figura 82. Transmitancia de una onda acústica generada por una DP superficial desde el aceite al PZT en un tanque de acero

A.I Efectos de la propagación acústica en las fronteras de diferentes medios

Como se puede comprobar, por la ecuación (10.2) el 89% de la energía de la emisión rebota hacia el interior, un 2% de la emisión se transmite directamente al PZT (que equivale a una atenuación de -17 dB de la emisión o a una atenuación de 7,08 veces la medida de la onda incidente en voltios) y un 9% de la señal va generando rebotes y transmisiones secundarios desde el interior del acero al exterior.

En nuestro caso, donde el material escogido para construir la cuba es PMMA tenemos que:

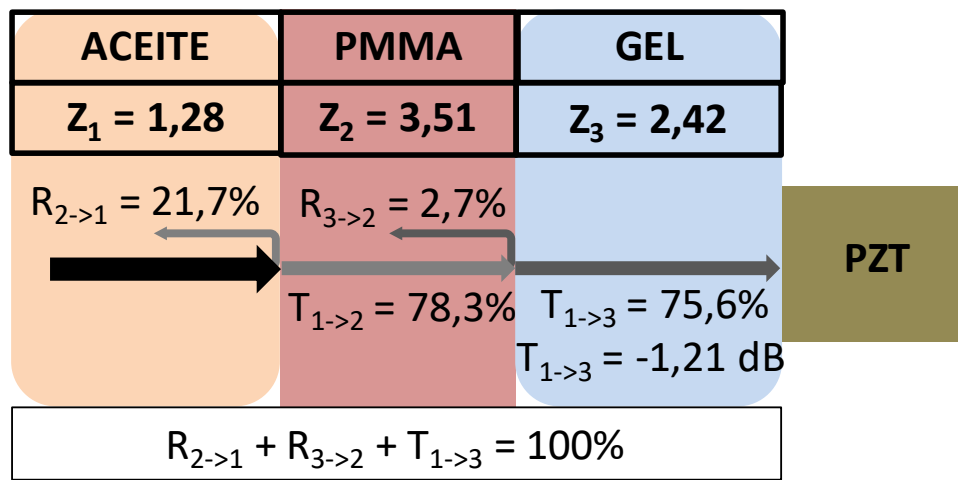


Figura 83. Transmitancia de una onda acústica generada por una DP superficial desde el aceite al PZT en un tanque de PMMA

Como se puede apreciar, en nuestro experimento se espera que las condiciones sean mucho más favorables que lo esperado en las medidas en cubas metálicas, ya que la atenuación esperada por el cambio de material de propagación es de -1,21 dB (0,87 veces la medida de la onda incidente en voltios) frente a los -17 dB que se esperarían en una cuba metálica.

En el caso de una DP interna generada en el *pressboard*, donde la emisión acústica se propaga primero por el *pressboard* la atenuación resultante es -1,66 dB:

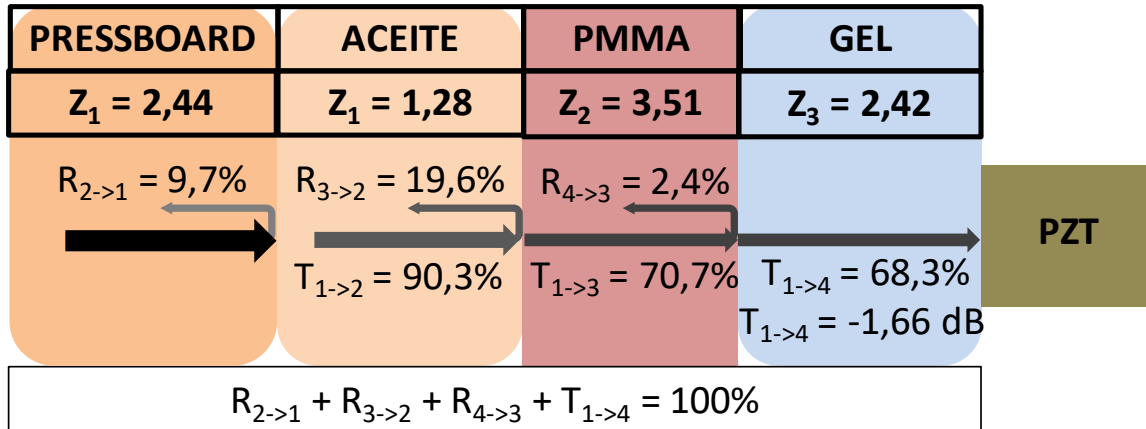


Figura 84. Transmitancia de una onda acústica generada por una DP interna desde el pressboard al PZT en un tanque de PMMA

Otro fenómeno que afecta a la intensidad transmitida y reflejada es el ángulo de incidencia de la señal acústica al atravesar dos medios distintos. Esta dependencia se conoce como la ley de Snell y relaciona el ángulo de incidencia de una onda acústica con el ángulo transmitido a partir del valor de la velocidad de los distintos medios:

$$\frac{1}{v_1} \text{sen}(\theta_1) = \frac{1}{v_2} \text{sen}(\theta_2) \quad (10.5)$$

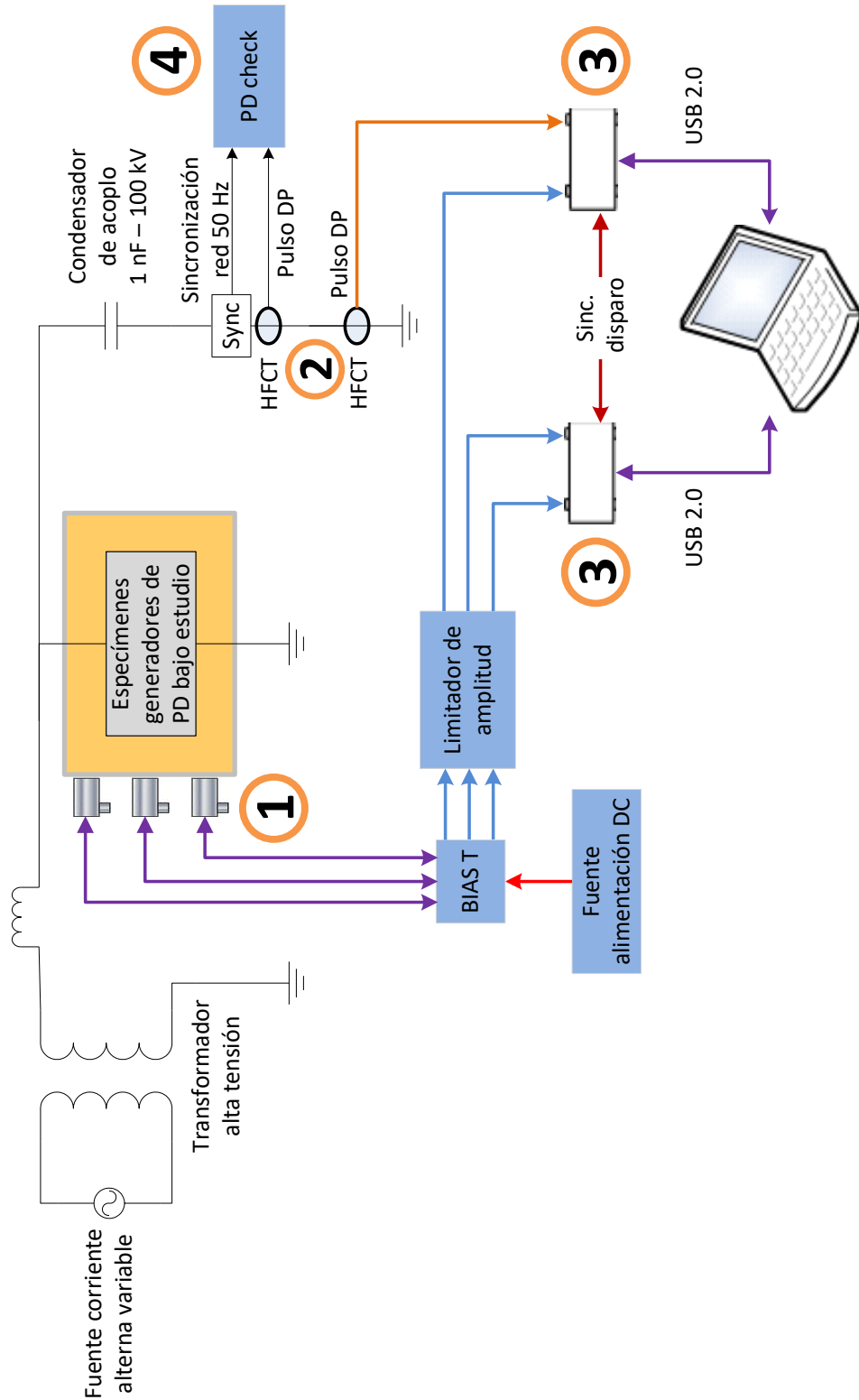
Una de las consecuencias de la ley de Snell es que se puede calcular el ángulo a partir del cual una onda se refleja completamente hacia el interior. A este ángulo se le conoce como *ángulo crítico* o *ángulo de Brewster*:

$$\theta_c = \arcsen\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (10.6)$$

Aplicando los valores conocidos de las velocidades de propagación, encontramos que el ángulo crítico para un interfaz aceite-acero el valor es $\theta_c = 13,9^\circ$. Es por tanto importante, ubicar los sensores en la ubicación adecuada para asegurar que dichos ángulos nunca van a ser rebasados, para evitar que toda la emisión se refleje hacia el interior.

A.II Plataforma de ensayos

A.II.1 Esquemático de la plataforma



A.II.2 Sensor piezoeléctrico R15I



R15I-AST Sensor

Integral Preamplifier

Acoustic Emission Sensor

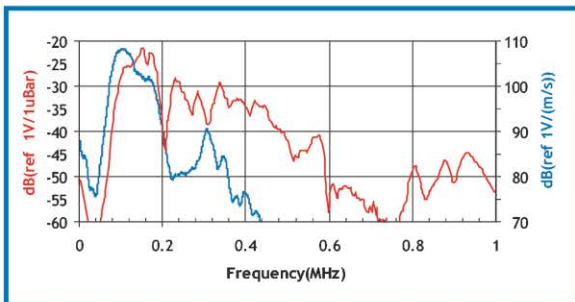
Description and Features

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 E1106; Calibration based on ASTM E976.

Operating Specifications

Dynamic

Peak Sensitivity, Ref V/(m/s)	109 dB
Peak Sensitivity, Ref V/ μ bar	-22 dB
Operating Frequency Range	80-200 kHz
Resonant Frequency, Ref V/(m/s).....	75 kHz
Resonant Frequency, Ref V/ μ bar	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.



195 Clarksville Road, Princeton Junction, NJ 08550

Phone: 609-716-4000 • Fax: 609-716-0706 •

Email: sales.systems@mistrasgroup.com • www.mistrasgroup.com

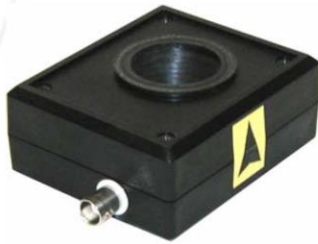


A.II.3 Sensor eléctrico HFCT



DATA SHEET MD-04.06.041 – rev. 00 – 25/08/2006

High Frequency Current Transformer



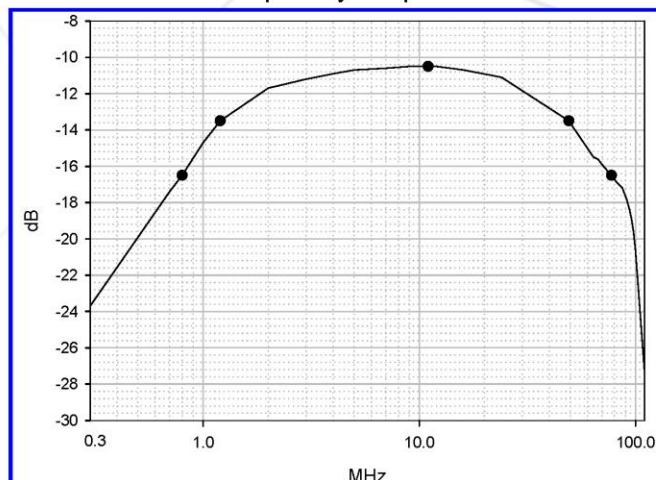
TechImp HFCT is an inductive sensor for partial discharge measurements. It is suitable for on/off line PD tests on many electrical systems (cables, transformers, rotating machine, etc.). It has to be applied to the ground connection of the system to be tested.

A BNC termination is available to connect the HFCT to the TechImp PD detection/analyzer unit (PDBase/PDSolver/PDMonitor) through a coaxial cable. The arrow indicates the output voltage (V_{out}) direction in comparison with the input current (I_{in}) direction: when the sensor is installed with the arrow directed to ground, the detected voltage signal (V_{out}) has the same phase as the input current (I_{in}).

Specifications

Bandwidth (-6dB)	1 MHz ÷ 80 MHz
Max Sensitivity (V_{out} / I_{in} at 42 MHz, 50 Ω load)	17 mV/mA
Load Impedance	50 Ω
Hole dimension	Φ 30 mm
Overall dimension	72 mm x 97 mm x 35 mm

Frequency response



TechImp Systems Srl, Via Toscana, 11/C- 40069 Zola Predosa (BO), Italy Tel. +39.051.19986050, fax +39.051.19986099
e.mail: sales@techimp.com URL: www.techimp.com

A.II.4 Sistema de adquisición *Cleverscope*

© Cleverscope Ltd 2003-8



Cleverscope Model CS328A Data Sheet

Summary

Cleverscope Model CS328A is a USB connected, PC hosted oscilloscope and spectrum analyser. It's easy to use Windows program integrates with standard office applications. Graphs and data can be copied and pasted to other applications, saved or loaded from disk, and printed.

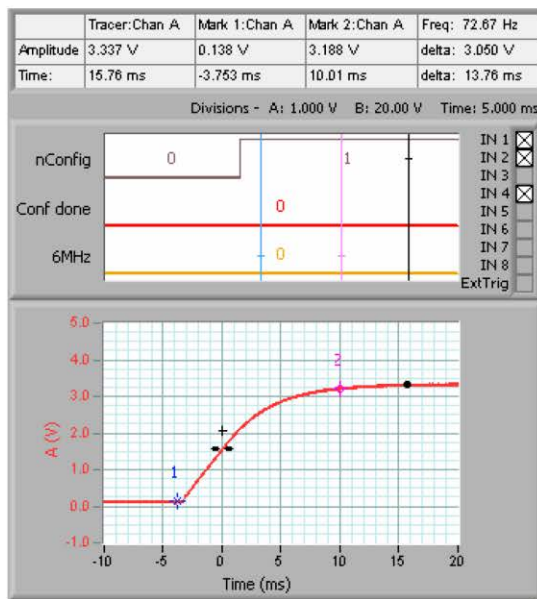
Cleverscope hardware resources include:

- Two 10 or 12 or 14 bit analog channels sampling simultaneously at 100 MSa/sec.
- One external trigger.
- Eight digital inputs sampling at 100 MSa/sec.
- A rear panel I/O connector with a 100 Mbit/sec bi-directional LVDS/RS422 link, and three RS422 outputs.
- Four or Eight Mega samples of storage per channel, providing two or more frames of signal of 20 or 40 ms of storage with 10 ns resolution. (Total storage is 64 Mbytes, distributed over the sample space).
- Anti-alias filter for improved Spectrum Analysis performance
- A dual triggered system allow triggers on edge, slope, period, count conditioned by digital values.
- Triggered LED on the front panel
- An optional plug-in signal generator, 0-10MHz, sine, square or triangle.

Cleverscope software resources include:

- Separate, freely moveable, windows to display the signal, a zoomed signal view, and the frequency spectrum of the signal.
- Spectrum analysis with a variety of conditioning windows.
- Signal averaging and filtering.
- Full mathematical functions including + / * sqrt, transcendental functions, integral differential and filtering. Up to 8 user defined mathematical equations.
- Logging of derived values – Frequency, RMS, p-p, period, DC, std dev and marker values.
- Signal measurement, including peak, RMS, DC, pulse width, period and frequency.
- Copy and Paste to other applications.
- Save and Open from disk, including autosave following trigger.
- User chosen units and scaling.
- Text annotation of each graph.

Here is a typical mixed signal window:



Specification

Acquisition

Acquisition Outputs	Waveforms: Sampled, Peak Detected, Filtered, Averaged in PC, Averaged in Acquisition Unit, and Spectrum
Acquisition Modes	Single Shot, Triggered, Automatic, Repetitive (High Frequency), Multiple Frame
Acquisition Rate to PC, via USB	20 Frames per second
Acquisition Rate, multiple frame	Continuous capture until buffer is full (4000 frames of 1024 samples)

Analog Inputs

Number	2
Input Coupling	DC, AC, GND
Input Impedance, DC coupled, all channels	1 M Ω \pm 2% in parallel with 20 pF \pm 3 pF
Probe Attenuation	1X, 10X
Maximum Voltage between Signal and Common at input BNC	300 Vrms (420V peak, duty cycle <50%, pulse width <100 msec) For steady state sinusoidal waveforms, derate at 20 dB/decade above 100 kHz to 10 Vpk at 3MHz and above.
Time delay between channels, typical	200 ps
Channel to Channel Crosstalk, typical	-70 dB at 10 MHz, 4V p-p signal.

Vertical

Digitizers	10, 12 or 14 bit resolution (depending on option module)
Full Scale Volts Range	20 mV to \pm 20V, 1X probe
Resolution	0.02 mV for 20 mV Full Scale.
Position Range	Full Scale Range as above moved anywhere in the range \pm 2.5V with 10mV resolution for full scale less than 5V, and anywhere in the range \pm 20V with 100mV resolution for full scale greater than 5V.
Analog Bandwidth	100 MHz, -3 dB
Instantaneous Capture Bandwidth	25 Mhz, with sin(x)/x interpolation
Repetitive Sampling Bandwidth	100 MHz, -3 dB
Analog Bandwidth in Peak Detect Mode	50 MHz
Analog Bandwidth with Anti-Aliasing filter on	20 MHz 5 th Order 0.5 dB passband ripple, 50 dB down at 100MHz.
Analog Bandwidth with Moving average filter on	1 MHz
Lower Frequency limit, AC coupled	10 Hz, 1x probe, 1Hz, 10x probe
Rise time at the BNC, typical	<3 ns
Peak detect response	Captures all pulses >10 ns in duration.
DC Gain accuracy	\pm 1% for Sample or Averaged acquisition mode
DC Measurement accuracy	\pm 1% for Sample or Averaged acquisition mode +0.1 division.
Delta Volts measurement	Volts between any two points, \pm 1% for Sample or Averaged acquisition mode +0.02 division.

Horizontal

Sample Rate Range	100 MSa/sec to 1500 samples/sec
Waveform interpolation	Sin(x)/x
Record Length	1024 – 4 000 000 samples for each channel
Sec/Div Range	1 ns/div to 5 s/div in 1,2,5 sequence

Sample Rate and Delay time Accuracy	+/-50 ppm over any >1 ms interval
Sample Clock jitter, typical	1 ps rms
Delta Time Measurement Accuracy	(±1 sample interval + 50 ppm +0.4 ns).
Position Range	+/- 21.47 secs of the trigger point, with 10 ns resolution.
Captured Sample window duration	1 usec – 40 msec with 10ns resolution 40 msec – 42.9 secs with 10ns - 10 us resolution. (Lower sample rates are used for smaller capture buffer sizes)

Trigger

Number of triggers	2
Trigger sources	Each trigger can be independently set to source from Channel A, Channel B, Ext Trig, Link Input, and Digital Inputs 1-8 as a pattern.
Trigger Sensitivity, Edge Triggered	Analog Channels – 0.2 Div from DC to 50 MHz External Trigger – 50 mV from DC to 100 MHz Digital Inputs – 100 mV from DC to 100 MHz
Trigger Modes	Edge, Pattern, Pulse Duration, Voltage slope, Voltage Window, Count
Trigger Filtering	Noise reject, HF reject, LF reject
Trigger Level Range	Internal: defined by scope graph. External: ±20V in 40 mV increments Digital: 0 – 8V in 10 mV steps
Trigger Level Accuracy	Internal: ±1% External: ±3% + 50 mV Digital: ±3% + 100 mV
Trigger Delay Range	0 – 21.47 secs with 10ns resolution.

Digital Inputs

Number	8
Input impedance	100kΩ ±2% in parallel with 10 pF ±2 pF
Input voltage range	-16 to +20V
Threshold range	0 – 8V in 10 mV steps
Threshold sensitivity	100 mV
Sample Rate	100 MSa/sec

A.II.5 Sistema de identificación *PDcheck*

Techimp PDCheck



Partial Discharge Monitoring Global Diagnostic System

**Affordable, fast, reliable
and flexible, the ultimate
solution for industrial
monitoring.**



SY-MD-04.05.09S_eng - PDCheck DATASHEET - ENG - REV. 02 - 21/07/09

- Innovative instrument for Partial Discharge recording, storage & processing
- Wide band, fast processing and large memory acquisition unit
- Flexible. Ideal for periodic or permanent monitoring of 3-phase electrical assets
- Powerful, PD Pulse detector and Waveform analyzer
- Fuzzy logic diagnostic tools and statistical processing
- Compact, 3 simultaneous channels digital acquisition unit

Accurate knowledge of the condition of electrical assets is essential for the establishment of Condition Based Maintenance (CBM) strategies. In this frame, on-line monitoring is getting more and more important since this practice can provide timely information about asset conditions. Partial Discharge (PD) measurement is recognized as the most important test for the assessment of the condition of electrical systems.

Reliable on-line PD Monitoring gives a powerful insight into the condition of the insulation system and provides real benefits, because it allows early fault detection, thus minimizing costly unplanned outages and equipment failures.

The PDCheck is the ultimate solution for industrial monitoring: a compact and powerful instrument which represents the state-of-the-art technology

Field of applications

PDCheck is suitable for periodic assessment or permanent monitoring of:

- Cable and cable accessories (such as joints and terminations);
- Electric Generators & Motors;
- Power and Measurement Transformers;
- Gas Insulated and Air Insulated Switchgears;
- Outdoor Insulators for Overhead Lines (pollution assessment).

A complete set of sensors covering all range of applications (Partial Discharge, Dissolved Gas Analysis, $\tan\delta$, Vibration Monitor and Distributed Temperature Sensing) grants a better diagnostic coverage exploiting synergies among information provided by different diagnostic techniques.

Techimp PDCheck



Techimp ultimate technology

Techimp technology (patented) allows different PD phenomena to be classified on the basis of their pulse shape, so that further analysis can be carried out on each dataset, separately. This enhances the likelihood of PD source identification, even in the absence of a skilled operator.

Techimp acquisition technology also provides efficient noise rejection. As a matter of fact, noise signals have been observed to be very different from PD signals. Therefore, Techimp classification system can be successful in separating the contributions of PD from those generated by disturbances. Specifically, each PD pulse waveform is acquired and the so-called equivalent time-length and bandwidth are evaluated and plotted on the TF map. Different types of discharges (e.g. PD due to distributed microvoids, slot discharges and noise in a rotating machine) shall group into different clusters in the TW map being characterized by different pulse shapes.

Specifications

Wide Band Acquisition PD channel

Acquisition rate	100MS/s, 3 PD Channels
Bandwidth	16kHz+30MHz built in UWB filter Additional external filters available
Input range	1+4000 mVpp
Input sensitivity	< 1 mVpp
Resolution	10 bits
Input Impedance	50 Ohm

Input channel for IEC 60270 HW

PD channel	1 channel with 12 bits A/D converter @20MS/s
------------	--

Trigger Mode

Pre-Trigger Recording	0-100% @ 10µsec 0-50% @ 20µsec 0-25% @ 40µsec
Dead time min	1 µs, non continuous

Input channels for AC signals

Quantity	3 AC inputs
Bandwidth	0.2 ÷ 5000 Hz
Resolution	14 bit
Maximum sampling frequency	20 kHz
Input voltage range	15 Vpp
Input impedance	1 MOhm

Input channels for DC signals

Quantity	4 DC inputs
Resolution	14 bit
Maximum sampling frequency	20 kHz
Input voltage range	0 + 2 V
Input impedance	1 MOhm

Improved Synchronization channel

Input range	5+200 Vpp - DC Coupled Sw selectable input range
Frequency range	0.1Hz+1kHz
Input Impedance	> 10 MOhm
Over voltage protection (surge arrester)	230 V _{DC} spark ± 20%

Test Voltage frequency

Phase accuracy	<1°
----------------	-----

Data Storage

Flash memory card	1 GB standard
-------------------	---------------

Communications and Connections

Physical Interface	Ethernet 10/100 Mb/sec
External Connections	n° 4 BNC Type connectors n° 2 Type female connectors n° 1 Type female connector n° 1 Fisher conn. DBPC 102 n° 1 RJ-45 Type connector n° 2 Standard ST FO connectors n° 1 Dry Contact connector

PC platform recommended requirements

Hardware	PIII 1 GHz, 512MB RAM, HDD 20GB, 1024x68 screen resolution, FDD & RW, Ethernet 10/100, serial/USB port, Win XP.
OS/Software	OS: Win XP (professional) compatible. MS Office for report generation required. Acquisition and processing programs provided by Techimp.

Operating environmental conditions

Temperature	5+50°C;
Humidity	90%, not condensing
Altitude	≤2000 meters

Power Supply

Voltage	5 V _{DC} , 2 A max
---------	-----------------------------

Casing

Box Dimensions	203mm x 135mm x 55 mm
Overall Dimensions	250mm x 180mm x 55 mm
Weight	1 kg

World Wide Warranty

1 year

Options

- Portable version (stand-alone)
- DGA, tanδ, VIB, DTS integrations option
- Techimp SW for IEC 60270 compliance
- External GPS module
- External Wireless module
- External Edge modem
- Flash memory card up to 8Gb

COMMUNICATION INTERFACE

PDCheck MK-II	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PDCheck MK-III	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PDCheck MK-IV	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

- (1), for standard applications
 (2), for portable and DGA applications
 (3), for vibration monitor, MiniPDtrans, tanδ and portable applications

Condition Based Maintenance

Under CBM, diagnostic signals are recovered from power apparatus to infer their state. Maintenance operations are carried out only when some parts of the system show poor reliability.

The Product

PDCheck is a compact, stand alone, global diagnostic system for the condition assessment of medium and high voltage electrical systems, based on the detection and analysis of PD

The software: 3 steps for PD

Monitoring

The PDCheck acquisition software contains all the functions needed to control the instrument, to set the correct values of the acquisition parameters, to acquire and visualize the PD dataset in order to get an immediate diagnostic response.

PD sensors and accessories

Techimp can offer a wide and complete range of sensors, filters and signal conditioning device to cover any possible PD acquisition need and optimize the measurement circuit setup, detection and analysis of PD.



The product and the information contained herein may be changed at any time without prior notification. This document nor any parts thereof may not be reproduced or transmitted in any form either electronically or mechanically, including photocopying and recording, without the express written consent of Techimp Systems S.r.l

A.III Implementación del interfaz de usuario

A.III.1 Aplicación *PDtool*

La aplicación *PDTool* es un compendio de herramientas de procesamiento y visualización de datos [92], desarrollados en entorno Matlab[®] que facilita la detección y localización de las DP [93].

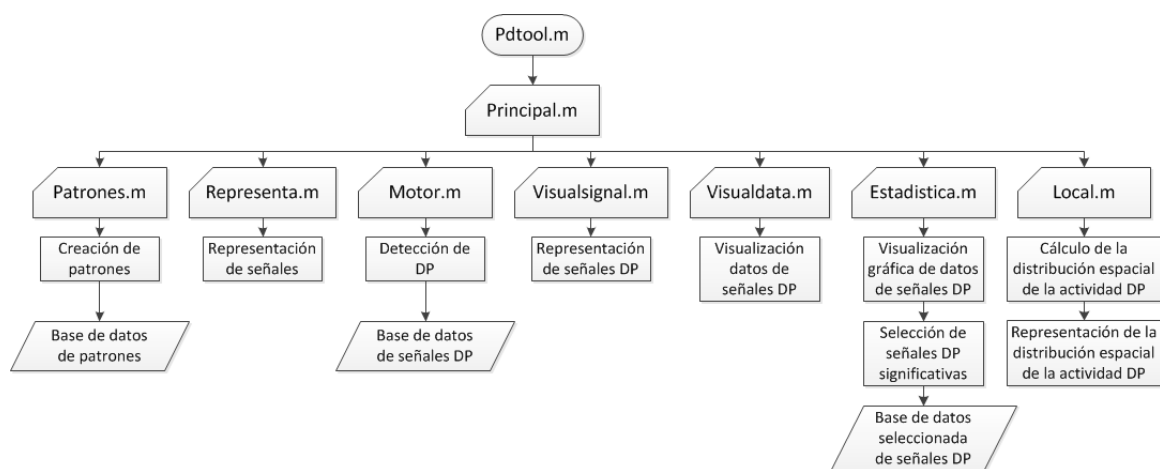


Figura 85. Menú principal

La aplicación se estructura en siete partes (Fig. 85) que son:

- 1) asistente de creación de patrones,
- 2) visualización de las adquisiciones,
- 3) detección de señales generadas por las DP en las adquisiciones,
- 4) visualización de las señales DP detectadas,
- 5) visualización de la base de datos generada con los parámetros de las señales detectadas,
- 6) herramientas de análisis de la base de datos y
- 7) herramienta para la localización de la actividad de las DP dentro de la cuba experimental.

A.III.1.1 Asistente de creación de patrones

La herramienta de patrones utiliza técnicas de filtrado wavelet y selección de ventanas temporales que permite la extracción y almacenamiento de patrones. Este parte del procesamiento es fundamental porque no sólo extrae patrones sino que, adicionalmente, configura el filtro wavelet que se ha de emplear en el acondicionamiento de las adquisiciones a analizar.

A.III.1.2 Herramientas de detección

Esta parte de la aplicación consta de un conjunto de herramientas de visualización, configuración y procesamiento con el objetivo de detectar señales provenientes de DP en las adquisiciones realizadas, utilizando para ello los patrones seleccionados en el asistente de creación de patrones.

La configuración de este motor de búsqueda se realiza a través de una serie de parámetros que son:

1) Selección de los archivos/adquisiciones a procesar: la aplicación está diseñada para abrir y procesar los archivos de las adquisiciones de forma secuencial, lo que reduce el tiempo necesario para el procesamiento por parte del usuario.

2) Fijar el número máximo de señales a detectar y el número máximo de señales DP válidas en las adquisiciones: la detección de DP se realiza mediante la búsqueda de máximos locales en la correlación cruzada entre el patrón seleccionado con el asistente de creación de patrones y la adquisición. La desventaja de esta técnica en la detección de DP es que primero se desconocen el número de DP que se pueden haber generado durante la adquisición, y segundo que la cantidad de máximos locales que contiene la función correlación cruzada es muy elevada, por lo que es necesario limitar la búsqueda.

3) Condiciones de validez de las señales detectadas: para decidir la validez de las ventanas temporales encontradas con la correlación cruzada, se fija un umbral en el PMCC que evalúa la similitud en la distribución de amplitud entre el patrón y la ventana detectada. Adicionalmente, se puede añadir un umbral en la amplitud de la ventana si la relación señal-ruido es suficientemente alta.

Una vez configurados los parámetros del motor de búsqueda se activa el procesamiento que se encarga de detectar DP en las adquisiciones realizadas. Mediante la

detección de máximos en la correlación cruzada se obtiene el instante de inicio de la señal DP detectada y, posteriormente, parámetros como los instantes de inicio y final, número de adquisición y canal de origen, amplitud, energía o PMCC de la ventana temporal detectada se almacenan en un registro de datos con objeto de ser analizados posteriormente.

La aplicación incluye una herramienta de visualización que permite representar las ventanas temporales de las DP detectadas en las adquisiciones.

A.III.1.3 Análisis de las descargas parciales detectadas

La aplicación permite realizar una estadística y comparación de cada uno de los parámetros calculados de las señales DP detectadas. Estas herramientas son de especial utilidad en tres facetas: (1) en la búsqueda de la relación entre la amplitud acústica y la carga de una DP, (2) en la búsqueda de las DP detectadas en las adquisiciones en un mismo canal que tengan similares características de retardo (y tengan por ello una alta probabilidad de haberse generado en la misma ubicación) y (3) para buscar la relación de proporcionalidad entre la energía de la misma emisión acústica detectada en distintos canales.

En el análisis se incluyen las herramientas necesarias para extraer y procesar de forma independiente diferentes conjuntos de datos y separar de esta manera señales generadas por distintos defectos en el aislante o eliminar por ejemplo señales con relación señal-ruido excesivamente baja.

Del análisis realizado en estas tres facetas se puede inferir la validez de las señales detectadas por la aplicación y la existencia de regiones en el aislante con un defecto persistente.

A.III.1.4 Localización de la actividad de descargas parciales

Una vez que las señales detectadas como DP son analizadas, la herramienta de localización permite calcular la actividad registrada tanto para cada canal de forma independiente (mediante histogramas) como para la actividad global como la suma de las actividades independientes detectadas por cada sensor.

Al detectar por actividad, la región dañada en el aislante se localiza donde la incidencia de eventos calculada para 3 o más sensores es mayor. De esta manera se consigue simplificar el cálculo y permite extender el procesamiento fácilmente a un sistema de adquisición de más de cuatro canales; además, esta forma de localizar la actividad hace que un error en la detección en alguno de los canales no afecte a la medida en el resto.

A.III.2 Resolución caso práctico

Para validar el sistema de adquisición y la aplicación desarrollada, se utiliza una plataforma de generación de DP superficiales. Estas DP se generan mediante dos electrodos (punta-plano), separados por varias capas de papel, y sumergidos en una cuba llena de aceite. Los electrodos se conectan a un generador AC de alta tensión (por encima de 10 kV). Como las DP se generan en torno a la punta, se espera que la actividad global (la suma de la actividad de cada uno de los sensores), se concentre en torno a dicha región.

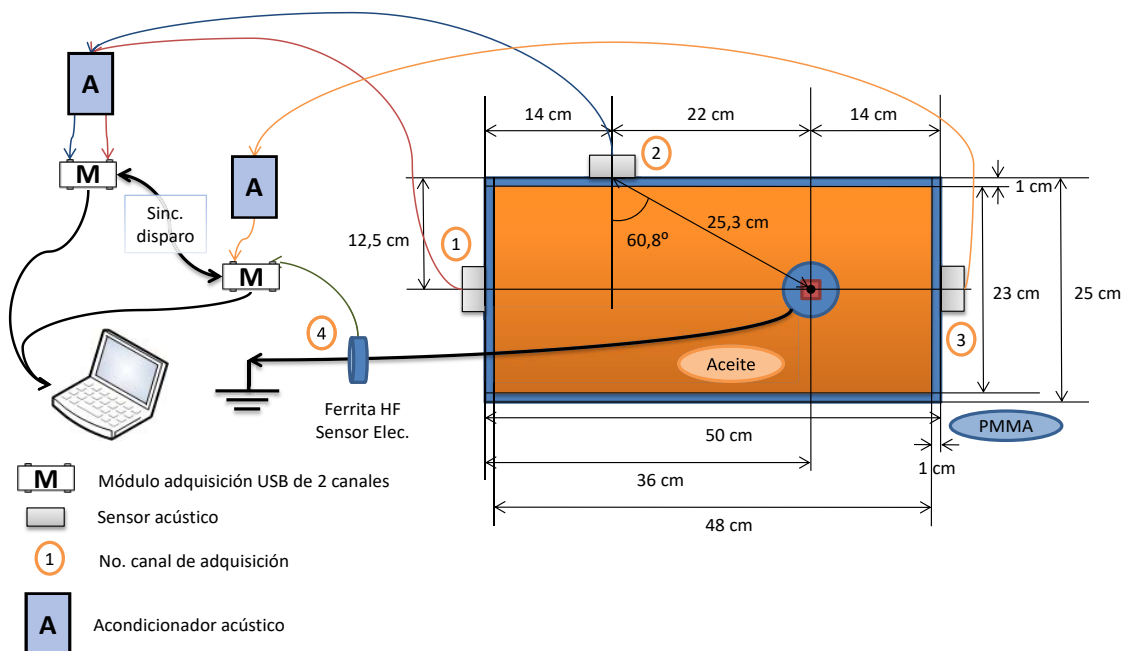


Figura 86. Sistema experimental de generación de DP superficiales y sistema de adquisición de señales acústicas y eléctrica

Una vez montado el experimento, se instala un sistema de adquisición de cuatro canales (tres sensores acústicos PZT externos y un sensor eléctrico) con el que se han capturado 55 series temporales de 20 ms a 100 MSps (Fig. 86).

Realizadas las adquisiciones, se utiliza la aplicación *PDtool* para seleccionar un patrón por canal (Fig. 87):

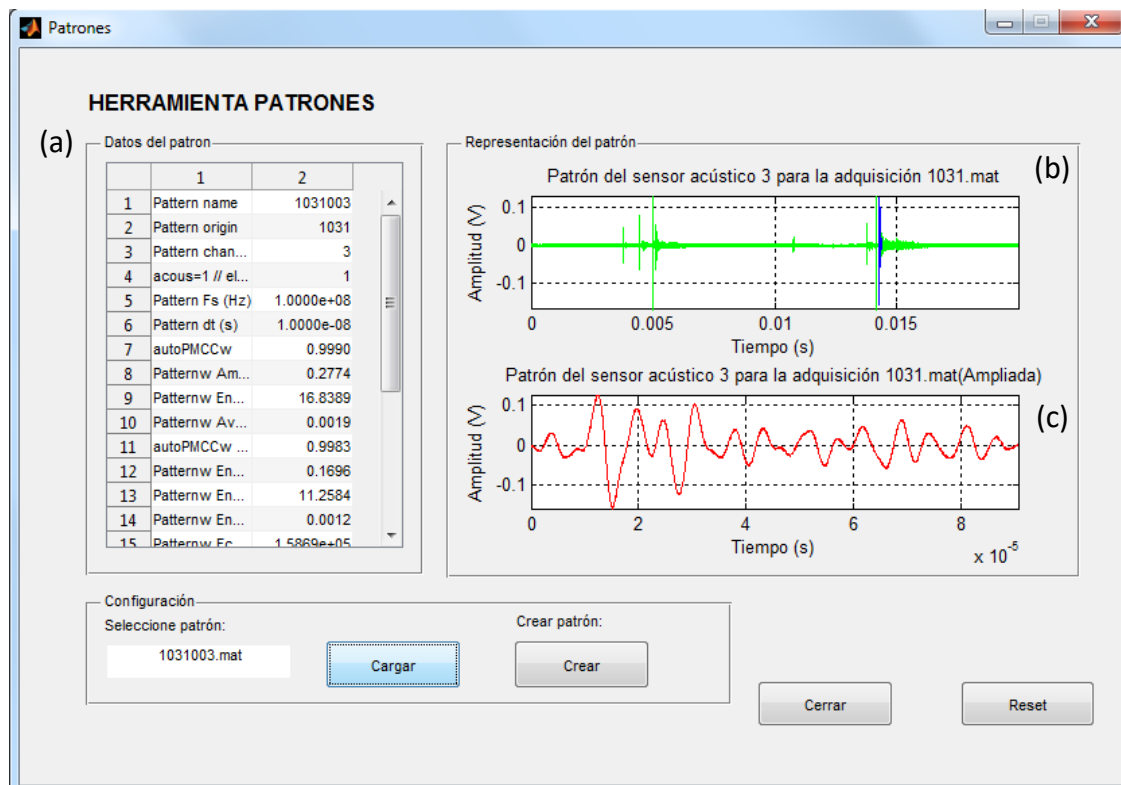


Figura 87. Herramienta de patrones. Seleccionada una señal patrón se representan (a) los datos asociados al patrón, (b) su ubicación y (c) su forma de onda

A partir del patrón seleccionado de cada canal, se configura la aplicación para detectar las DP en las series temporales adquiridas. Los parámetros escogidos son: número de búsquedas igual a 5, número de DP válidas igual a 2, wavelet madre utilizada para el filtro wavelet “Daubechies20” y umbral de PMCC igual a 0,5.

Con esta configuración, la aplicación busca dos DP en cada canal acústico y, por último, busca una referencia eléctrica compatible temporalmente con la configuración del sistema. Como resultado de la búsqueda se crea una base de datos de DP (Fig. 88) que contiene información relevante de cada ventana temporal como los índices de inicio y de final de la DP, así como su energía, su amplitud, la ubicación del sensor que la ha detectado, fichero de origen, etcétera. Dicha base de datos permite ubicar temporalmente las ventanas detectadas (Fig. 89).

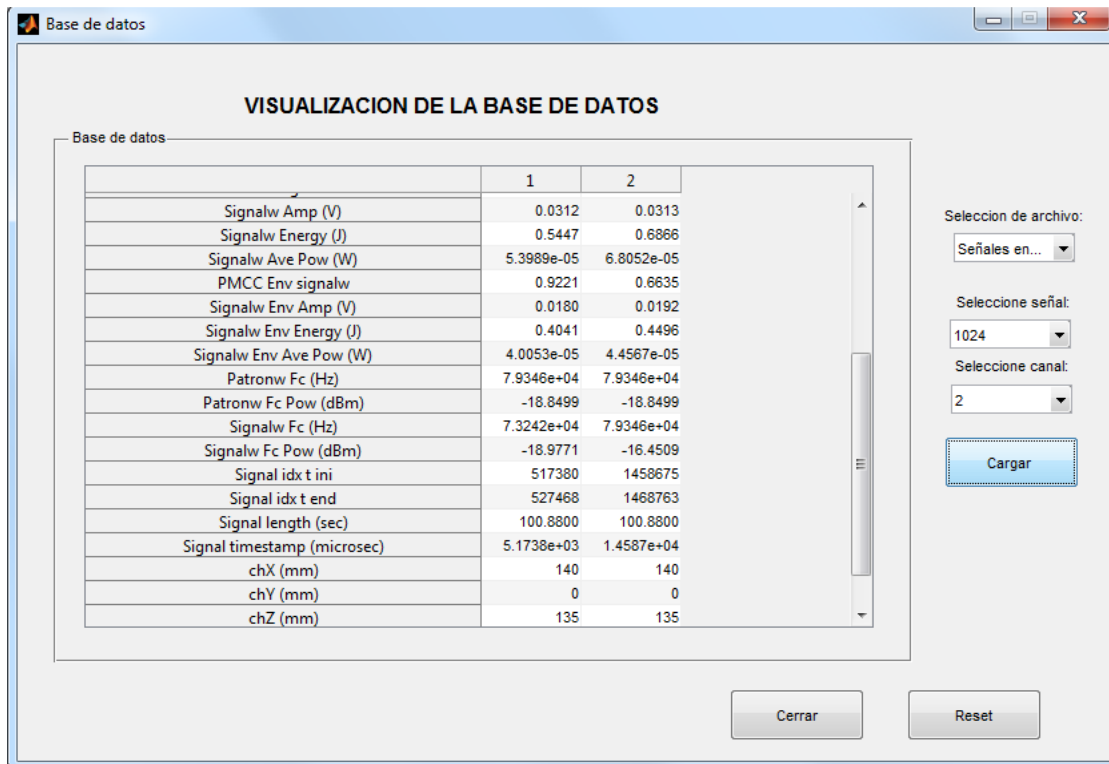


Figura 88. Visualización de la base de datos de las DP obtenidas por canal

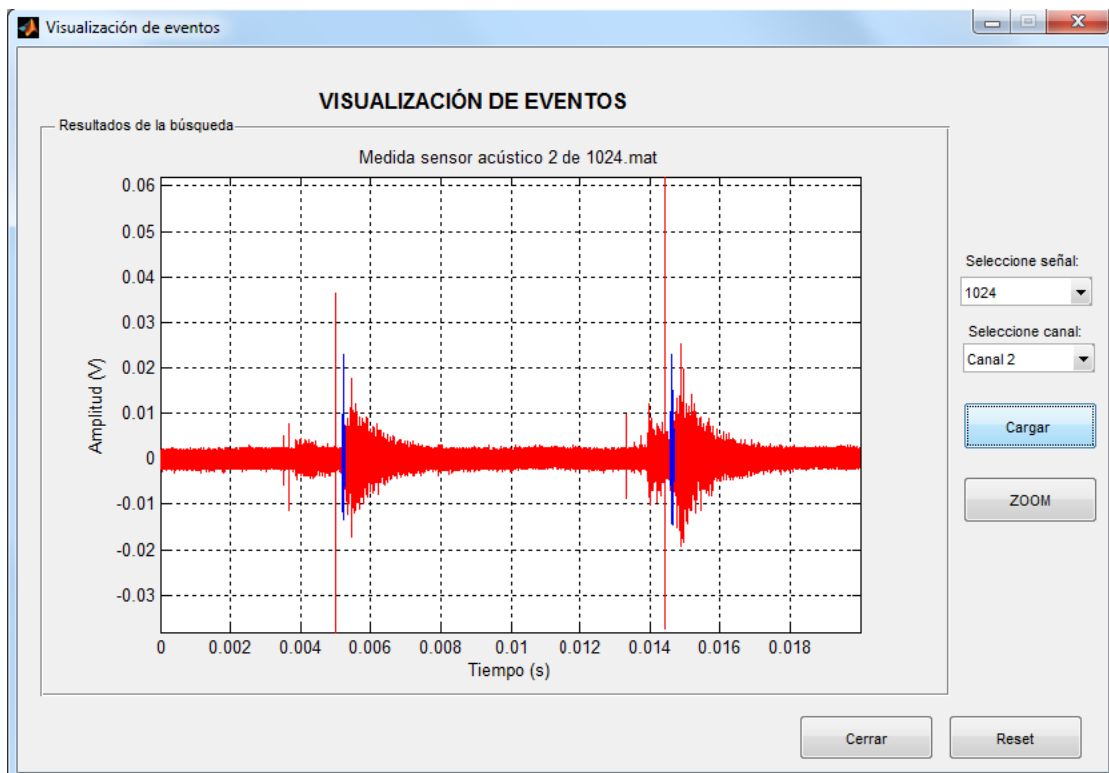


Figura 89. Visualización de las DP detectadas

Para facilitar el análisis de las DP encontradas, la aplicación permite asimismo realizar una comparación de las distintas variables (Fig. 90) y extraer relaciones entre parámetros de interés como puede ser la relación entre la amplitud de la señal acústica y la carga desplazada cuando se genera una DP:

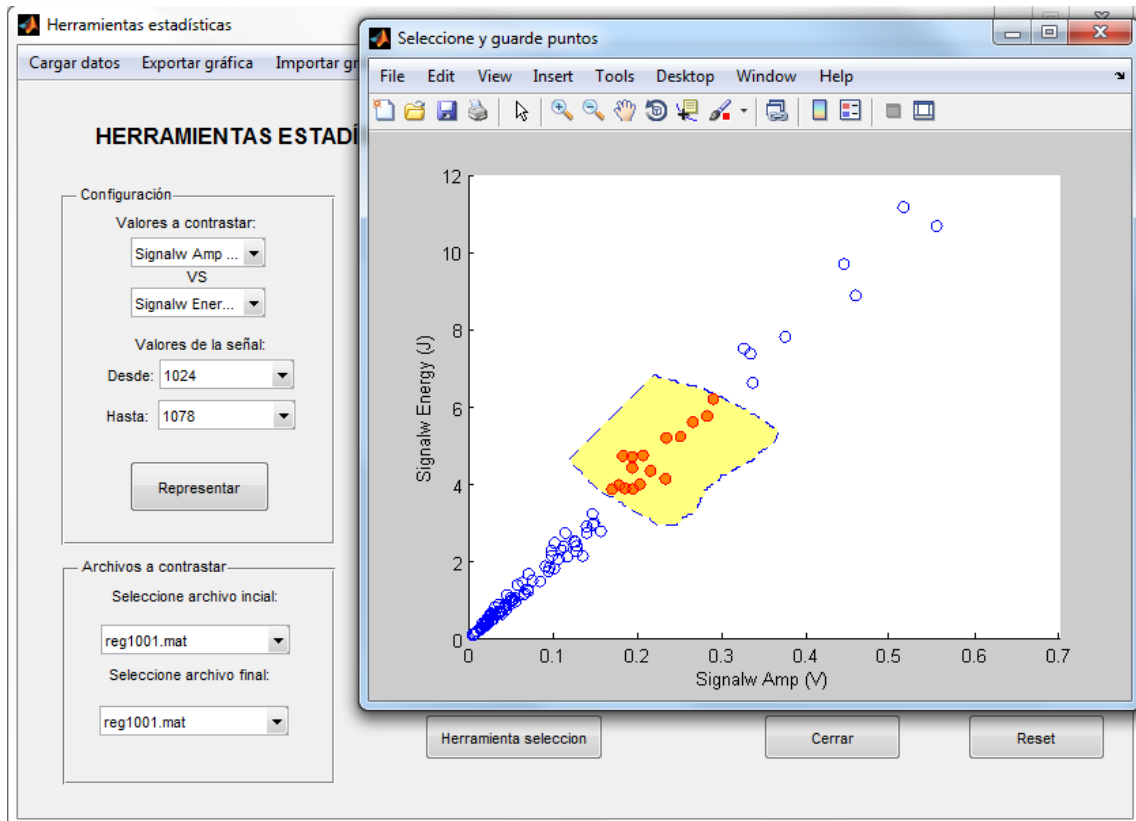


Figura 90. Herramienta para la comparación de medidas de las DP y para seleccionar las DP de interés cuyos valores están resaltados

Por último, la aplicación permite estudiar la ubicación de la actividad de las DP a partir de la localización de la actividad detectada por cada uno de los sensores acústicos de forma independiente. Dicha actividad se puede observar de dos maneras diferentes, una de ellas es observar la incidencia de la actividad por cada uno de los sensores (Fig. 91) y la otra consiste en representar, en cortes del eje z, la actividad resultante dentro de la plataforma de ensayo (Fig. 92):

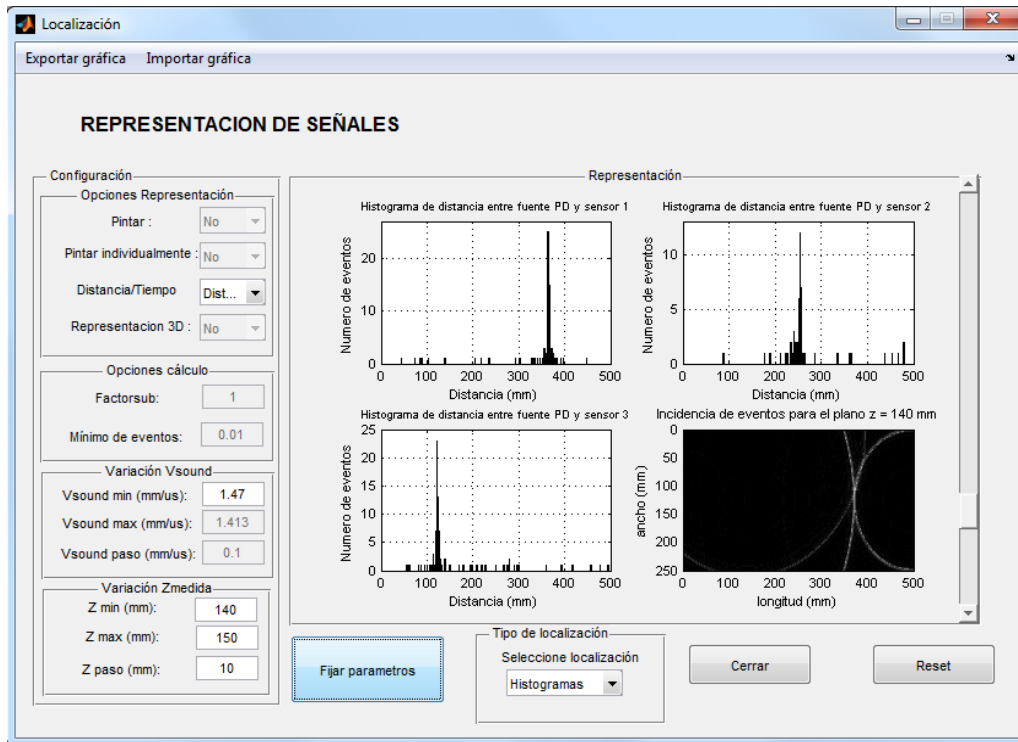


Figura 91. Visualización de la actividad registrada por cada uno de los sensores y una representación para uno de los cortes del eje z

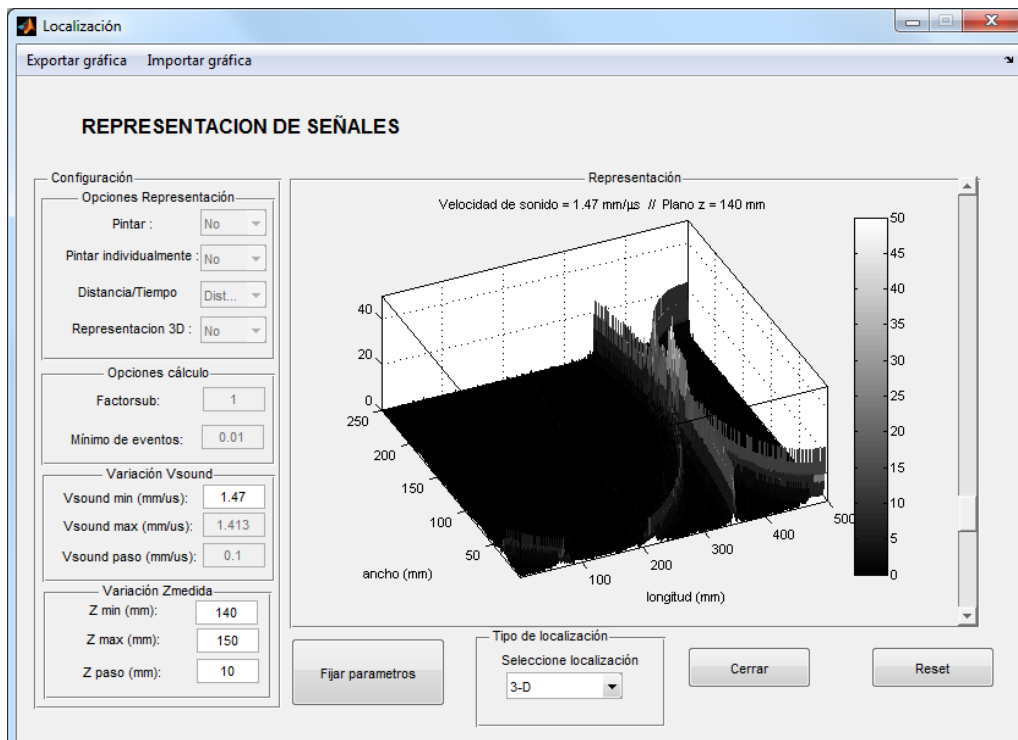


Figura 92. Visualización tridimensional de la actividad para un corte del eje z

Como se puede observar en Fig. 91 y Fig. 92 la actividad se concentra en una región muy próxima a la posición de la punta donde se generan las DP superficiales (Fig. 86).